doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.010

土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展

王全九[1,2]　杨　婷[1,3]　刘艳丽[1,3]　赵光旭[1,3]　张鹏宇[1,3]

(1.西北干旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,西安 710048;
2.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100;
3.西安理工大学水文及水资源研究所,西安 710048)

摘要:降雨条件下坡面土壤养分伴随水土流失而流出田块,不仅降低土壤肥力,而且引起水环境污染。从坡面养分迁移机理、数学模型模拟、控制措施 3 个方面对国内外学者在坡面养分随地表径流迁移过程的研究进展进行回顾。坡面养分迁移机理研究主要包括降雨特征、土壤特性、坡面特征、化学物质特征、耕作与施肥方式、地表覆盖及管理控制措施等因子对坡面养分迁移的影响作用。数学模型主要包括经验模型、基于物理过程的理论模型。物理基础模型基本上是在假设养分传递内在机制基础上建立的,包括混合层理论、对流扩散作用、雨滴击溅作用、水流冲刷作用等。考虑到我国土壤侵蚀现象严重,坡面养分迁移过程受到土壤侵蚀作用的影响,因此针对防治土壤侵蚀而提出了一些相关的控制养分迁移的措施。同时,对目前研究中存在的问题以及进一步需要深入研究的内容进行了说明。

关键词:溶质迁移;降雨;坡度;初始含水率;径流;模型拟合

中图分类号:X592　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)06-0067-16

Review of Soil Nutrient Transport in Runoff and Its Controlling Measures

Wang Quanjiu[1,2]　Yang Ting[1,3]　Liu Yanli[1,3]　Zhao Guangxu[1,3]　Zhang Pengyu[1,3]

(1. *State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area*, *Xi'an* 710048, *China*
2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau*, *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: With the impact of rainfall, soil nutrient transported along soil particles and water into surface runoff. It decreased soil fertility, polluted water resources in surface and ground, and then induced a series of ecological environmental problems, which attracted more attentions of researchers at home and abroad. The objectives of the study mainly focused on the development of both the mechanism and controlling measures of soil nutrient transport proposed by researchers all over the world. For the mechanism, the impact of different factors on soil nutrient transport was mainly discussed, and the empirical models and physical based mathematical models were also discussed. Besides, all mentioned physical based models were based on the inner mechanism of nutrient transfer, including the theory of mixing depth, convection and dispersion, the impact of raindrop and water scouring. For the controlling measures, methods protecting soil and nutrients from erosion and runoff were proposed with consideration of serious erosion phenomenon in China. Meanwhile, the existed problem and further study work were also discussed.

Key words: solute transport; rainfall; slope; initial water content; runoff; model fitting

收稿日期:2016-02-16　修回日期:2016-03-16
基金项目:国家自然科学基金项目(51239009)
作者简介:王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail:wquanjiu@163.com

引言

土壤养分随地表径流流失是一个复杂的物理化学过程,受到多种因素影响,涉及环境学、水文学、土壤物理、土壤化学、地下水以及生态学等多种学科。随着世界人口的不断增加,增加粮食产量成为一项重要而艰巨的任务,而提高土壤生产力是必选之路,然而不良的耕作措施(加大化肥和农药的使用量、灌溉方式、砍伐森林等)造成严重的水土流失问题,导致大量的土壤养分随地表径流进入河流、湖泊。土壤养分流失在造成土地质量下降,降低化肥利用率的同时,还污染水体,造成生态环境失衡。养分从土壤传递至地表径流的研究,不仅是研究土壤养分迁移和土壤侵蚀研究的基础问题,也是研究农田合理施肥、植物对养分吸收与利用、土壤及水环境污染防治等的基础[1]。深入研究各种因素的内在影响机制,有助于更好地理解和控制土壤养分随地表径流的迁移过程,减少水土流失。目前,土壤养分随地表径流流失问题成为多个领域重要研究内容和研究热点。为了有效地预测和控制土壤养分随地表迁移过程,国内外学者采用理论分析和数学模型相结合的方法对其开展研究。本文主要从机理研究、模型的发展与应用、预测与防治等方面进行回顾,以期推动相关领域的研究发展,并为提出有效控制坡面养分流失措施提供参考。

1 土壤养分随地表径流迁移机理研究

土壤养分通常以两种形态进入径流:一是溶解态,通常情况下,养分溶解于土壤溶液中,通过水分交换等作用进入地表径流;另一种是吸附态,这部分养分被吸附在土壤颗粒表面,通过解吸或伴随侵蚀泥沙进入地表径流。养分从土壤进入地表径流的过程受到多种因素的影响,如降雨特征、土壤特性、坡面特征、化学物质特征、耕作与施肥方式、地表覆盖及管理控制措施等。

1.1 降雨和坡面水流特征对土壤养分流失的影响

降雨特征主要包括雨强、雨型、雨量、雨滴动能及降雨时间等。降雨特征直接影响坡地产流产沙特征,表现在降雨初期,土壤初始含水率较低,雨滴打击溅土粒,使土壤团粒和土体被分散,改变土壤表面特征。王全九等[2]利用人工模拟降雨研究了降雨强度、降雨动能条件下的土壤溶质与径流的有效混合深度,发现随降雨强度、雨滴动能的增大,有效混合深度和养分流失量增加,而径流养分浓度与雨强关系不明显。SNYDER 等[3]利用染色体作为示踪剂,研究了降雨动能对土壤养分随径流迁移的影响,结果表明径流养分浓度随雨滴动能增加而增加。FLANAGAN 等[4]研究雨型对坡面养分径流流失的影响,结果表明雨型对径流养分浓度的影响无统计学差异。GAO 等[5]研究了雨滴动能对土壤养分流失的影响,结果显示雨滴动能显著影响土壤养分流失量。李裕元等[6]以黄绵土为研究对象,研究雨强对坡地磷随地表径流流失的影响,结果表明相同雨量条件下,径流中的溶解磷随雨强的增大而降低,泥沙浸提态磷与全磷的含量与流失量以小雨强时为最大。黄绵土坡地径流中不同形态磷的含量随雨强的增大而降低,而总的流失量受雨强与产流过程等多种因素的影响。田坤等[7]认为雨滴打击加速了土壤表面溶质迁移至地表径流的过程。试验结果表明降雨强度、地表径流总量、地表水位线的增加,均加速土壤溶质的扩散过程,对流-扩散作用存在着一种交互作用,能加速分子扩散过程。郭太龙等[8]研究坡面水流冲刷条件下溶质迁移特性,通过对比分析坡面水流的水动力参数与径流溶质迁移量间的关系,研究了不同地表状况下黄土坡面土壤溶质随径流迁移的水动力学特性,研究结果表明,不同坡面地表状况下,糙率系数和平均水深之比(n/h)与侵蚀过程中随径流迁移的溶质存在一定的关系,径流溶质 Br^- 平均浓度、径流溶质 Br^- 的平均流失率以及径流溶质 Br^- 的相对流失量均随 n/h 的增加而减小。径流溶质 Br^- 的平均流失率以及径流溶质 Br^- 的相对流失量与水流水动力学参数 n/h 具有指数关系。PARR 等[9]以及 RICHARDSON 等[10]研究表明,水流剪切力加速土壤溶质进入地表径流。当水流的剪切力大于土壤的抗蚀力时,将引起土壤颗粒的剥离[11]。水流引起的土壤颗粒侵蚀导致水流与土壤水以及溶质混合,土壤溶质伴随侵蚀的土壤颗粒进入地表径流。水流的侵蚀能力决定了土壤溶质进入地表径流的总量和强度。伴随水流的冲刷作用,土壤溶质层不断暴露于土壤表层并与土壤水混合,进入地表径流。

1.2 土壤特性对坡面养分流失的影响

土壤特性主要包括土壤的质地、结构状况、孔隙度、水分和温度状况等。不同特性土壤的氧化还原性和通气状况存在差异,因此,土壤的水分运行规律以及土壤中养分的转化速率和存在状态也不尽相同。WALTON 等[12]认为沙粘壤土比粉轻壤土和粉粘壤土养分径流流失量大,养分径流流失量随土壤初始含水率增加而增加。降雨条件下,土壤表层容易形成结皮,影响土壤入渗特性、含水率及径流过程。MOORE 等[13]研究了土壤结皮在不同形成期对侵蚀过程的影响,并将结皮的形成分为 3 个过程

（径流前期、径流增加期、径流稳定期）。结果表明3 种土壤的侵蚀率均在径流增加期达到最大值，而在后期减小或逐渐趋于平衡，说明结皮在稳定的侵蚀条件下降低了土壤的侵蚀力。黄土高原地区，土壤有机质含量低（小于 10 g/kg），土壤结构发育较差，因而磷素极少向深层迁移，土壤磷素易于参与径流流失。晏维金等[14]在研究磷的富集机理时发现径流流失的沉积物主要以粒径为 0.25 mm 以下的团聚体为主，80% 以上的磷以颗粒态形式流失，而 60% ~90% 的颗粒态磷随粒径为 0.1 mm 以下的团聚体流失。董广辉等[15]研究了人工降雨条件下磷的迁移，结果表明土壤含水率变化大大影响了土壤侵蚀和磷的迁移潜力，降低这种流失的可能性所采取的管理措施应该考虑，例如保护性耕作、作物覆盖，对于富磷和易侵蚀区尤其重要。王丽等[16]借助人工模拟降雨试验，以黑垆土为研究对象，研究 5 种前期含水率条件下（5%、9%、13%、17%、20%）土壤氮磷流失特性，结果表明前期土壤含水率范围在 5% ~9% 时，养分流失量变化不大，前期含水率为 17% 时，径流中水溶性磷、硝态氮、铵态氮浓度最大，前期含水率为 17% 是养分流失变化的一个临界值。

1.3　地形条件对坡面养分迁移的影响

地形条件包括坡度、坡长、坡型、坡向等，其中，坡度和坡长是影响坡地土壤侵蚀的两个重要因素。在一定范围和条件下，土壤侵蚀量与坡度呈正比关系，大量观测资料表明，在斜面坡度超过一定限度时，其侵蚀量与坡度呈反比关系，说明存在坡度临界值，称为“侵蚀转折坡度”，许多学者认为在 25°左右[17-18]。唐克丽等[19]研究提出发生浅沟侵蚀的临界坡度为 15° ~20°，大于 25°的陡坡地浅沟发生的频率最高，其侵蚀量可占坡耕地总侵蚀量的 70%。刘青泉等[20]在运动波理论基础上通过对土壤侵蚀与坡度关系的分析表明，坡面土壤侵蚀具有坡度界限，且土壤侵蚀的界限坡度是一个变量，随颗粒粒径、容重、坡面糙率、径流长度、降雨入渗差值（净雨量）以及土壤摩擦因数等因素而变化，但一般情况下土壤侵蚀的坡度界限应在 41.5° ~50°范围内。孔刚等[21]通过室内人工模拟降雨试验，研究不同坡度土壤侵蚀和养分流失的过程与机制，研究结果表明土壤中养分流失量随坡度的增大而增大，在 20°时存在转折点，25°时土壤流失量呈减小趋势。王辉[22]研究认为 5°、15°、25°坡度条件下产流时间表现出非线性规律，坡度 5°的产流时间大于坡度为 15°的产流时间，而坡度 15°的产流时间却略小于坡度 25°的产流时间，并认为在坡度 0° ~15°范围内，坡度越大产流时间越早；在坡度 15° ~25°范围内，有效承雨面积起主要作用，即有效承雨面积越大，产流时间越早，但坡度 15°并不一定是临界坡度。对于土壤性质一定的坡面，坡面糙率越大，径流平衡距离越长，净雨量越大，则土壤侵蚀的界限坡度越小。王辉等[23]研究了黄土坡面不同坡度下土壤氮、磷和钾随地表径流迁移的特征。研究结果表明，在定坡长土槽坡度变化为 5° ~25°范围内，初始产流时间随坡度增大呈先变小后增大的趋势，产流 15 min 内，径流量均急剧增加，随后趋于稳定。随着坡度增加，水土流失程度加剧，径流溶质浓度增高，土壤侵蚀对径流溶质浓度的贡献增大。基于指数函数和幂函数拟合试验数据的结果，表明幂函数模型更适合模拟黄土坡面非饱和条件下径流溶质浓度变化过程，也可描述径流磷和钾的流失过程。王全九等[24]通过田间模拟降雨试验，分析了坡度对坡面物质迁移特性的影响，结果显示雨强一定时，坡度达到 15°，径流强度最大，相应携带养分流失量增加，用幂函数可以很好地反映田间养分随径流迁移的过程。董文财[25]研究发现不同坡度条件下（5°、15°、25°）径流量差别不明显，15°与 25°坡面条件下的径流泥沙量、养分较为接近，并显著大于坡面为 5°时的泥沙量及养分。

坡长对水土养分流失的影响主要表现为由坡面上部至下部沿程各断面的径流量不相等，从而引起坡面各部位的侵蚀方式和遭受的侵蚀程度不同。据野外调查和观察，发现在坡面下部细沟侵蚀程度大于上部，而且随着坡长的增加，这种现象更加明显，所以，坡长与有机质和速效养分流失呈指数函数关系[18]。李君兰等[26]研究了降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应，指出坡度的主效应及坡度、坡长的交互效应对单宽产流速率有显著地影响。

AHUJA 等[27]通过室内模拟试验研究了坡长和坡度对土壤磷随径流迁移的影响，结果表明坡长从 33 cm 增大到 100 cm 时，单位土壤面积的平均径流磷浓度也增加，坡度在 4% ~16% 范围内增大时，径流磷浓度按照相应比例增加。刘秉正等[28]认为当坡度小于 12°时，养分流失量与坡度的关系为线性关系；当坡度大于 12°时则为幂函数关系，坡度增大，养分流失量增加，但土壤肥力的衰减速度减慢。白红英等[29]认为坡地梯化后可减少地表径流量以及径流的流速，从而降低土壤的侵蚀量；此外，当土壤颗粒向水体迁移时，侵蚀沉积物通常趋于黏粒富集和所吸附的化学元素富集，减少了土壤养分的流失，因此，黄壤旱坡地梯化是减少旱坡地水土流失以及土壤养分流失的有效措施。总的来说，坡度、坡长与养分流失量呈正相关，从控制土壤养分流失的角

度而言,减小地面坡度和改变坡长可有效地减少土壤养分流失量。

1.4 坡面管理措施对坡地养分流失的影响

研究表明与传统耕作方法相比,深松、犁耕种植和免耕等可分别减少总磷流失量 81%、70% 和 59%。少耕免耕加秸秆覆盖可使年径流量减少 52.5%,土壤流失量减少 80.2%。整地方式同样对土壤养分流失具有显著影响[30-31]。AHUJA 等[27]利用 2 种砂壤土和一种粘土,以磷酸钙为试验对象,发现随着磷酸钙放置深度增加,土壤磷随径流流失量呈指数减少。GUO 等[32]研究了地面覆盖碎石对控制坡面水土养分流失量功效,结果显示随着碎石覆盖度增加水土养分流失量大量减少。研究表明,植物篱、草灌过滤带、残茬覆盖等措施可以有效缓冲水流、拦截泥沙,进而有效减少养分流失。与传统耕作方法相比,深松、少耕种植和免耕等水土保持耕作方法可分别减少总磷流失量的 81%、70% 和 59%。少耕免耕加秸秆覆盖可使年径流量减少 52.5%,土壤流失量减少 80.2%。不同整地方式林分对径流中营养元素流失的含量影响很大。穴状整地、带状整地及不整地林地中营养元素年流失量分别为 199.02、254.65、334.42 kg/hm^2,其中,穴状整地流失量最低,主要是因为穴状整地有效地减少地表径流且提高土壤的毛管孔隙度,从而提高了土壤的渗透性能。不同的施肥方法研究表明,表施或表层混施会显著增加径流中水溶态养分的浓度,而深施(条施与穴施)条件下则随径流流失的养分相对较少。张兴昌等[33-34]认为植被覆盖度可有效地减少土壤侵蚀,由于土壤全氮多为有机氮,与土壤颗粒结合紧密,因此植被在防止土壤颗粒流失的同时,相应地减少了土壤全氮的流失,随着覆盖度的增大,减少作用随之增加;而土壤矿质氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)的流失,随着覆盖度的增加而加剧。王辉等[35]研究了降雨条件下土壤容重对黄土区坡面土壤氮、磷和钾随径流迁移过程的影响,结果表明,随着土壤容重增大,产流时间提前,径流系数增大,土壤流失量增多,土壤磷和钾流失量也随之增大。径流养分浓度变化对土壤容重的响应程度由大到小表现为:NO_3^--N、PO_4^{3-}-P、K^+。径流养分流失率过程曲线存在峰值点,它是土壤容重、溶质理化特性以及土壤水文参数综合作用的结果。其他减少养分流失的坡面管理措施还包括植物篱、草灌过滤带、残茬覆盖等,可以缓冲水流、拦截泥沙和增加水分入渗。

1.5 地表覆盖对养分流失的影响

地表覆盖对土壤侵蚀及养分流失有重要的影响,目前碎石覆盖、植被覆盖(植被类型、植被覆盖度、植被枯枝落叶层、植被根系)、化学覆盖等对土壤侵蚀及养分流失的影响研究较多,植被的垂直结构、形态结构更是影响土壤侵蚀的重要因素。

碎石覆盖是覆盖方式的一种形式,它具有拦截雨滴、调节地表径流、改良地表土壤的固结等作用,是延缓或阻止土壤侵蚀并影响溶质随径流迁移的重要因素之一。GUO 等[32]对比研究了在撂荒草地及放置 2 类大小不同的碎石,覆盖度分别为 5% 和 20% 时黄土坡地侵蚀与溶质迁移过程,研究结果表明大碎石对径流的减弱效果比小碎石明显,小碎石减小泥沙及养分(以 Br^- 为例)的效果比大碎石显著。

植被对土壤侵蚀及养分流失的影响主要体现在冠层截留降雨、茎干和枯落物拦蓄分散径流、改良根系土壤增加抗冲性或抗蚀性和渗透性等方面。植被覆盖可以有效降低雨滴能量,增加土壤入渗,减少径流量与泥沙量。李鹏等[36-37]通过野外模拟冲刷试验,研究不同处理条件下草类植被坡面径流的水动力学特性和侵蚀产沙规律,结果表明在相同的试验条件下,植被覆盖度越高,植被越完整,径流运动所遇到的阻力越大,植被完整程度愈高,其阻滞和拦蓄径流的能力愈强,因而表现出了随着植被完整程度的增加坡面的径流量增加,径流流速减缓,径流含沙降低的趋势。张兴昌等[33]通过野外径流小区试验研究了 17 种植被覆盖对土壤侵蚀和氮素流失的影响,结果表明不同植被类型覆盖下,泥沙氮素富集率存在明显差异,总体从小到依次为:作物、牧草、草灌间作,而侵蚀量大小顺序与此基本一致。REID 等[38]研究了植被类型对径流和侵蚀的影响差异,试验以新墨西哥北部地区典型的 3 种植被类型林冠地、林冠地中的植被及林冠地中的裸地为研究对象。指出 3 种植被类型对径流及产沙过程的重要性不同,林冠层中的裸地常作为林冠地中的植被产流、产沙的来源,而且小规模的水沙迁移对生态环境也有重要的影响。张亚丽[39]通过室内模拟降雨研究秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响,结果表明秸秆覆盖对土壤侵蚀过程中随径流和泥沙流失的矿质氮素有着双重影响:①可使侵蚀量显著减少,尤其减沙效应十分明显,相应也减少了径流和泥沙中的养分流失量。②可使坡面径流流速减弱,增加了表层土壤氮素与地表径流的作用强度,使溶解和解吸至单位径流中的矿质氮素含量增加,但明显减少了总的矿质氮径流流失量。秸秆覆盖可显著减少肥料氮的流失,且覆盖量愈大,保肥效果愈显著。王升等[40]采用野外放水冲刷试验对不同苜蓿覆盖度条件下的径流量、泥沙及养分流失量进行研究,结果

表明径流量、泥沙量及 Br^- 流失量随覆盖度的增加而减少。土壤植被覆盖度的增加使得地表平均糙率增大，从而减小了土壤侵蚀量与养分流失量。

王辉等[41]采用室内模拟试验研究聚丙烯酰胺(PAM)对黄土坡地水分养分迁移特性的影响，与对照处理比较，施加 PAM 对径流硝态氮的影响不明显，但显著改变了径流磷及径流钾浓度随时间的变化过程，减少坡地土壤流失量的同时降低了泥沙中钾及磷的流失，并且影响了坡地水分再分布过程，减少水分深层渗漏，降低了土壤硝态氮淋失的风险。张长保等[42]借助室内人工模拟降雨试验，研究降雨条件下施加 PAM 对砂黄土入渗-径流、土壤侵蚀、养分迁移特征的影响，结果表明，与裸地相比，施加 PAM 降低土壤入渗，增加径流，有效地减少了土壤侵蚀，径流的增加造成硝态氮、水溶磷及水溶性钾累积流失量的增加，并推荐 PAM 的适宜用量为 1 ~ 3 g/m^2。DONG 等[43]研究 PAM 对塿土坡面水分、泥沙及养分迁移的影响，结果表明 PAM 用量越大，产流时间越早，减沙效果越显著，径流溶质浓度和累积流失量随 PAM 用量增加而减小。目前，PAM 防治水土流失已成为国际普遍采用的化学处理措施。唐泽军等[44]研究表明 PAM 具有降低土壤入渗或提高土壤入渗作用，取决于 PAM 的类型、使用剂量、土壤类型以及使用方式等。刘艳丽等[45]在黄绵土中添加不同含量的纳米碳，借助室内土柱试验研究土壤累积入渗曲线、水分特征曲线及溶质穿透曲线，结果显示土柱入渗率随纳米碳含量的增加而减小，纳米碳对水分的入渗产生阻碍作用，纳米碳有效提高了土壤吸持溶质的能力，使完全穿透时间延长，弥撒度增大，土样中的 Cl^- 含量随纳米碳含量的增加而增大。

1.6　土地利用方式对养分流失的影响

不同的土地利用方式导致土壤下垫面条件发生变化，直接影响地表填洼量、地表径流、土壤入渗、坡面水流特性、土壤侵蚀及养分迁移过程。傅伯杰等[46]认为，在黄土丘陵区从坡顶到坡脚采用农地-草地-林地的土地利用结构具有较好的土壤养分保持功能，其原理也与植被过滤带的作用机理相似。邓红兵等[47]研究表明年养分流失量从大到小依次为：裸地、橘园、菜地、草地、柏木林，裸地因径流系数和径流中养分含量均较高，其输出养分总量明显高于其他子系统，可见没有植被覆盖和吸收作用，系统养分流失是比较显著的，因此应该尽量把裸地加以改造利用。何园球等[48]在红壤丘岗区的研究表明，不同林地水分和养分径流损失随植被生长而减少，渗漏损失则随植被生长而增加；水分、养分径流损失量从大到小依次为：自然草被、马尾松林、针阔混交林、阔叶林，渗漏损失量则相反。孟庆华等[49]研究也表明，与乔林地、灌木林地以及荒地相比，农田流失的径流泥沙量最大，但磷素流失量与径流中磷素的含量具有更为密切的关系。陈磊等[50]利用人工野外模拟降雨试验，研究不同土地利用类型对水土流失及养分流失的影响，结果显示林地蓄水保土效果显著，优劣依次表现为：林地、草地、撂荒地、裸地，与裸地相比，林地、草地的水土保持效果显著，林地、草地的养分流失量也明显少于撂荒地和裸地。总之，在各种土地利用方式中，农田养分流失量显著高于其他利用方式，说明农业耕作是土壤养分流失的主要来源；植被覆盖和采用水土保持耕作方法可以有效减少坡地农田磷素流失，因此，退耕还林(草)工程可有效改善目前土壤养分流失严重的局面。

1.7　坡地养分流失的方式、途径及其对环境的影响

坡耕地土壤氮、磷的流失一方面造成土壤肥力退化和生产力低下，另一方面引起水体富营养化，对受纳水体的水环境产生重要影响，严重危害人类生存的自然环境。袁东海等[51]对红壤氮、磷坡面流失方式的研究表明，磷的流失形态主要为泥沙结合态，约占总磷流失量的 70% 以上；氮素流失的主要形态在一些试验区为水溶态，之所以表现为不同特征，原因可能在于红壤中的胶体主要为高岭石和铁铝氧化物，其所带的负电荷少，不利于吸附土壤和化学氮肥中带正电荷的 NH_4^+，造成 NH_4^+ 和 NO_3^- 极易随径流流失，径流中水溶性氮素含量增高。钱婧等[52]研究了不同坡长及覆盖度对氮流失的影响，结果表明，NO_3^--N 和 NH_4^+-N 流失浓度主要表现为径流前期浓度较高，之后浓度逐步降低并最终趋于稳定。径流中的氮流失主要以溶解态氮为主，NO_3^--N 比 NH_4^+-N 含量高，但是随着降雨时间的延长，不溶性氮的比例增加。径流量对各形态氮流失的影响十分明显，植被覆盖度和坡长与 NO_3^--N 的流失量呈显著正相关。POTE 等[53]在人工模拟降雨条件下，利用 6 种方法提取土壤试验磷预测径流中的溶解态活性磷(DRP)及生物相容性磷(BAP)，结果显示用蒸馏水、氧化铁纸及酸化草酸铵提取物等方法能够较好地预测径流中 DRP 和 BAP 的浓度。另外，不同处理的农作方式均有较大程度截流推移质的作用，推移质的减少在一定程度上也减少了通过推移质途径流失的土壤氮素。对于 2 种迁移方式引起养分流失占总流失量的百分比目前仍在研究中。BAKER 等[54-55]指出对于大多数养分而言，以溶解态形式流失到径流中的养分占较高比例(90% 以上)。通过研究氮、磷的迁移流失，发现相当大比例的氮(8% ~

80%)和磷(7% ~30%)是以溶液形式流失到径流中的[56-58]。大量研究表明土壤养分进入地表径流的主要内在驱动力大致可以归纳为对流扩散作用、雨滴击溅搅动、水流的冲刷作用等[8,59-60]。最早的研究指出土壤中的养分借助对流扩散作用迁移至地表径流,WALLACH 等[61]提出了水膜理论,假设静止的水膜存在于土壤与径流之间,而养分以普通的分子扩散方式穿过水膜进入地表径流。AHUJA 等[59]研究发现降雨加速了土壤养分的迁移,以^{32}P 作为示踪剂,置于土层的不同位置,发现地表水流经土壤会夹带土壤孔隙水进入地表径流,并假设土壤磷进入地表径流的方式主要是由于雨滴击溅引起的加速扩散作用。

2 土壤养分随地表径流迁移的数学模型

土壤养分随地表径流迁移过程复杂,当地表径流产生时,土壤表层的养分在雨滴击溅、径流冲刷、土壤侵蚀、扩散等的作用下以不同的方式进入地表径流。土壤养分进入地表径流的过程伴随着水分运动和泥沙侵蚀。目前,国内外学者提出了各种各样的数学模型模拟土壤养分随地表径流的迁移过程,模型大概分为经验模型和机理模型。

2.1 经验模型

早期研究磷的释放过程时,AMER 等[62]尝试用动力学原理进行描述,发现磷的释放过程复杂,一阶动力学模型不适合描述该过程。KUO 等[63]通过试验研究和观测,提出简单的幂函数动力学方程描述磷随时间的解析吸附过程

$$P_{ads} = at^n \tag{1}$$

式中 P_{ads}——t 时刻磷的解吸量,mg/kg

t——时间,min a、n——相关参数

在此基础上,CHIEN 等[64]提出了描述土壤中磷释放过程的半对数方程

$$P_d = 1/\beta\ln(\alpha\beta) - 1/\beta\ln t \tag{2}$$

式中 P_d——土壤磷的解吸量,mg/kg

α、β——常数

SHARPLEY 等[65]选择 5 种土壤,研究 3 种不同初始浓度、不同震荡时间 (5 ~180 min)以及 6 种土水质量比条件下土壤磷的解吸过程,用简单的经验模型描述为

$$P_d = KP_0 t^{\alpha} W^{\beta} \tag{3}$$

式中 P_0——土壤磷的初始解吸量,mg/kg

W——水土质量比,mL/g

K——特定土壤的经验常数

VADAS 等[66]提出经验模型预测降雨过程中磷的释放及其径流浓度。模型以天为时间步长进行模拟,试验地表层施用定量的磷肥,并选取 3 种地表覆盖(裸地、秸秆覆盖、草地),测定每场模拟暴雨的雨量及径流量,径流磷的浓度方程为

$$P = kP' f_p / I \tag{4}$$

其中 $$f_p = 0.034\mathrm{e}^{3.4R/I}$$

式中 f_p——磷肥扩散因子

P——径流溶解磷质量浓度,mg/L

P'——地表可溶解磷肥质量浓度,mg/L

k——磷肥溶解百分比

I——降雨总量,cm

R——径流总量,cm

虽然经验模型能够较好地描述土壤养分随地表径流的变化过程,但是缺乏物理理论基础,对土壤养分进入地表径流的机制描述过于简化,不利于推广应用。因此,大部分学者将注意力转移到机理模型的开发应用上。

2.2 基于物理过程的机理模型

2.2.1 混合层深度模型

为了更好地解释土壤养分进入地表径流的现象,DONIGIAN 等[67]提出了土壤混合层概念,假设土壤表面有一层浅薄的混合层,降水与土壤混合层、土壤溶液完全混合。土壤表层养分与雨水的混合程度决定了养分的流失量,通常用交换层、混合层深度、有效混合深度、等效混合深度等表示混合程度。随着混合层概念的提出,展开了对养分迁移过程的研究工作。随着对混合层的认识和理解的不断深入,不同研究者赋予其不同的物理意义。混合层厚度的确定,从以表土层某实际深度作为混合层厚度到有效混合层深度(EDI)提出,发展到等效径流迁移深度(ETD)建立。最初 FRERE 等[68-70]提出的混合深度为 10 mm,这一深度在之后的研究中被广泛应用。SNYDER 等[71]研究指出土壤的混合层深度可能小于 10 mm。以表层土壤为研究对象大致分为两种情况:一种是以实际土壤表层某一厚度作为研究对象,根据此层化学物质平衡建立模型;另一种是以有效混合深度为研究对象,根据有效混合深度内化学物质的质量平衡建立模型。

(1) 以实际土壤某一厚度为研究对象的模型

根据实际情况,选择表层土壤某一厚度,一般为 0.2 ~1.0 cm,有时可以达到 15 cm。认为降雨期间在此厚度内,雨水与土壤水完全饱和,因而在某一时刻,径流水、入渗水及土壤水浓度相同,且只有此厚度内的溶质可随径流迁移,在此厚度以下溶质与径流无关,同时假定在此厚度内的溶质均匀分布。

(2) 以有效混合深度为基础的模型

1981 年 AHUJA 等[59]利用^{32}P 作为示踪剂,对

土壤表层溶质在降雨期间的运动情况进行试验研究，发现有效混合深度在 2 ~ 3 mm，并且还发现土壤混合程度随土层深度指数递减至 20 mm。表层土壤溶质在降雨期间并非均匀分布，参与径流迁移的概率并不相同，且不等于土壤表面浓度，因而提出有效混合深度(EDI)概念，认为降雨水、土壤水在此土层内瞬时完全混合(图 1)。

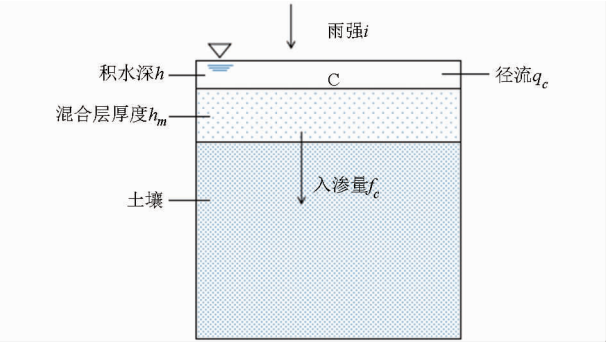

图 1　降雨条件下土壤养分分布示意图

Fig. 1　Schematic of soil nutrient distribution under rainfall condition

如果不考虑水土流失、土壤溶质吸附，且土壤为饱和土，则根据有效混合深度内溶质质量平衡，可得出径流溶质浓度为

$$c(t) = c_o \exp\left(-\frac{i}{h_m \theta_s} t\right) \tag{5}$$

式中　$c(t)$——径流溶质质量浓度，mg/L

c_o——土壤溶质初始质量浓度，mg/L

i——降雨强度，cm/min

θ_s——土壤饱和含水率，cm^3/cm^3

t——产流时间，min

h_m——有效混合深度，cm

实际情况下，由于雨滴打击及径流冲刷作用，混合程度逐渐衰减。降雨时土壤中的溶质不能瞬时与降雨水完全混合。土壤中的溶质浓度随土层呈衰减变化。AHUJA 等[72]进行试验研究表明，在入渗率较大情况下，通过对完全混合模型进行对数变换，实测值的对数值与时间并非呈理论上的线性关系，因此，其指出完全混合模型不适合描述非饱和条件下的溶质迁移过程。考虑到溶质在土壤中以两种方式存在：溶解态、吸附态。一些学者结合相互混合深度概念和有效混合层内溶质质量平衡原理建立了土壤溶质与径流相互作用模型

$$c(t) = c_o \exp\left(-\frac{i}{h_m(\theta_s + \rho_b k_d)} t\right) \tag{6}$$

式中　ρ_b——土壤干容重，g/cm^3

k_d——吸附系数，cm^3/g

考虑到降雨过程中土壤溶质与雨水不完全混合，一些学者建立了不完全混合模型

$$bc(t) = bc_o \exp\left(-\frac{bi - (b-a)f}{h_m(\theta_s + \rho_b k_d)} t\right) \tag{7}$$

式中　a、b——相互独立的参数

f——土壤入渗率

王全九等[73]基于 Philip 公式，将吸附性径流溶质浓度表示为

$$bc(t) = bc_o \exp\left(-\frac{(a-b)S(t-t_m)^{0.5} + bti}{h_m(\theta_s + \rho_b k_d)}\right) \tag{8}$$

式中　t_m——降雨入渗与积水入渗的时间差

S——土壤吸水率

并假定当 $a = b = 1$ 时，认为径流溶质浓度、入渗水溶质浓度及有效混合层内溶质浓度相同，即为完全混合模型

$$bc(t) = bc_o \exp\left(-\frac{(t-t_m)i}{h_m(\theta_s + \rho_b k_d)}\right) \tag{9}$$

不完全混合模型比完全混合模型更符合实际情况，在水土流失较严重的区域，由于表层土壤的侵蚀，下层土壤溶质也可能参与径流迁移。借助这一模型的径流溶质浓度与时间关系，模拟结果与实测值在产流后期有较大偏差，说明这种不完全模型在黄土高原应用有一定的局限性。

(3) 以等效混合深度为基础的质量传递模型

国外学者大多数将土壤溶质浓度变化过程利用指数函数进行描述，这种模型适合于饱和土壤或不考虑水土流失，但是黄土地区存在严重的水土流失，水土流失加重了土壤溶质流失。王全九等[1-2]根据黄土区土壤溶质随地表径流迁移试验资料分析，考虑黄土区严重水土流失特征，提出了适合黄土区的等效对流质量传递模拟模型，认为混合层中的溶质具有相同的概率进入地表径流，土壤溶质在混合层中的浓度分布是均匀的，并存在于土壤溶液中。这一概化实质是将不同特性的化学物质迁移差别归功于质量传递系数。这样无论土壤溶质是随侵蚀泥沙或水进入径流，都可认为是通过对流质量传递方式进入径流，使模拟模型变得简单而且便于对不同条件进行比较。其具体表式为

$$c(t) = \frac{k_m c_o \rho_b H_o}{r(t)(it_P + \rho_b \theta_o H_o)} t^m \tag{10}$$

式中　t_P——产流时刻，min

H_o——等效混合深度，cm

θ_o——土壤初始含水率，cm^3/cm^3

k_m——质量交换系数

$r(t)$——径流强度，L/min

m——参数

DONG 等[74]基于等效质量传递模型，并结合 GAO 等[60]提出的雨滴击溅侵蚀模型，用侵蚀因子

替代等效质量传递模型中的质量传递系数,首次将土壤侵蚀作用与幂函数形式的溶质迁移模型结合,并用实测资料进行验证,结果较好。其表达式为

$$c(t)=\frac{\alpha P\theta_s c_o\rho_b H_o}{r(t)(it_P+\rho_b\theta_o H_o)}t^{\mathrm{m}} \tag{11}$$

式中 α——土壤分解系数,g/cm^3

P——参数

WALTER 等[75]研究发现,土壤混合层深度受到雨强、坡度、初始含水率的影响,土壤养分进入地表径流的过程中,土壤混合层并非是一个常数。YANG 等[76]研究发现,土壤混合层深度与雨强、初始含水率呈幂函数变化,与坡度、土壤质地呈指数函数变化,并建立了土壤混合层深度与雨强、坡度、初始含水率、土壤质地之间的线性回归关系。还有学者指出土壤混合层深度可能是时间的函数,关于土壤混合层深度的问题目前仍在研究中。

(4) 土壤溶质分子扩散模型

AHUJA 等[72]以 Br^- 作为示踪剂,研究人工模拟降雨条件下溶质随径流的迁移过程。指出表层土壤以下及更深层的溶质迁移至径流水中不可能是由于雨滴打击作用造成的,而应该是由于雨滴打击、扰动作用产生吸取作用,形成压力梯度,产生对流混合作用。认为把化学物质从土壤向地表径流迁移过程是一个加速扩散过程,而对这一过程的描述必须考虑土壤中的溶质浓度与雨水混合随土壤深度的不均匀性。因此,基于经典的对流-弥散方程来描述这种入渗条件下的溶质迁移

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(T\frac{\partial C}{\partial z}-VC\right) \tag{12}$$

式中 C——t 时刻土壤水溶质质量浓度,mg/L,假定径流浓度在表层土壤等于 C

z——土层厚度,cm

V——流速,m/s T——扩散系数

通过对比研究普通分子扩散和加速扩散在描述土壤溶质向径流水迁移过程的影响,AHUJA[77]提出了对流扩散模型

$$\begin{cases} c=c_o\theta_s\dfrac{\partial c}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial t}\left[T(z)\dfrac{\partial c}{\partial z}-fc\right] \\ \qquad (t=0,\ 0\leqslant z\leqslant L) \qquad (13) \\ \dfrac{\partial c}{\partial z}=0 \quad (t>0,\ z=L) \qquad (14) \\ -T(z)\dfrac{\partial c}{\partial z}+fc=-(i-f)c-\dfrac{\partial c}{\partial t}d \\ \qquad (z=0,\ t>0) \qquad (15) \end{cases}$$

其中 $T(z)=D_s+D_p$ 或 $T(z)=D_a+D_p$

式中 L——土层最大厚度,cm

$T(z)$——传递系数

D_s——分子扩散系数

D_a——加速扩散系数

D_p——机械扩散系数

2.2.2 雨滴击溅模型

降雨期间,下落的雨滴具有动能,降落地面的雨滴转化为冲击力,击实土壤表面的同时,将土壤颗粒从土体分离,使土壤溶质与雨水不断混合,伴随地表径流流失。当地表水层较薄时,较大的雨滴能击穿水层,破坏下层土壤结构,此时的雨滴动能,一部分消耗于扰动水层,增加雨水与表层水的混合;另一部分消耗于土壤中,用于分离土壤颗粒与土体。当水层深度与雨滴直径的比值大于一定程度时,雨滴打击土壤的能量将趋于零,雨水与土壤的混合程度趋于零,作用深度也趋于定值。整个降雨过程中,雨滴对土壤的击溅作用是随时间变化的[1-2]。雨滴击溅决定了土壤溶质随地表径流迁移的特点,雨滴的驱动过程和扩散作用扮演重要角色。图 2 为降雨条件下雨滴与土壤表层的作用示意图。

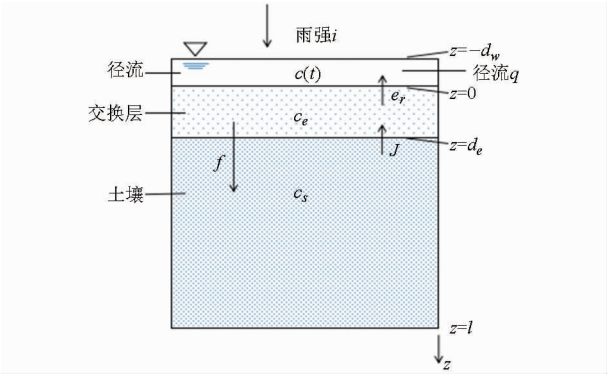

图 2 模型的物理化学迁移过程概念机理图

Fig. 2 Conceptual schematic of physical and chemical transport processes of model

但是当前的迁移模型没有考虑上述两个过程,有的采用了物理意义不确定的“有效”参数。GAO 等借助 HAIRSINE 等[78]提出的土壤侵蚀模型推求了基于物理过程的溶质迁移模型,利用类似土壤侵蚀过程,结合雨滴控制过程,提供了一个新方法模拟化学物质的迁移过程。该模型将土壤-水系统分成 3 个部分,即径流层或积水层、交换层和土壤层。其中,交换层即为 HAIRSINE 等[78]土壤侵蚀模型中提出的“保护层”,它是雨滴打击作用形成的,控制着土壤溶质进入径流的过程。模型假定土壤表层化学物质在雨滴打击下跃入径流,土壤深层化学物质通过扩散作用也迁移到表层,模型中所有参数可直接测量,或已公开发表,无需对模型进行拟合和标定。采用数值计算方法求解模型方程,求解结果与试验数据拟合很好($R^2>0.9$)。通过对模型的物理和化学参数进行敏感性分析,认为化学物质迁移到径流

过程中雨滴的控制和扩散作用十分重要。该模型基本结构为

$$\frac{\partial \alpha c}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(D_s\frac{\partial c}{\partial z}-fc\right) \tag{16}$$

其中

$$\alpha=\rho_b k_d+\theta_s \tag{17}$$

$$\frac{\partial(\alpha d_e c_e)}{\partial t}=J+e_r(\lambda c(t)-c_e)+f(c(t)-c_e)$$

$$J=-D_s\frac{\partial c_s}{\partial z} \tag{18}$$

$$d_w\frac{\partial c(t)}{\partial t}+q\frac{\partial c(t)}{\partial x}=e_r(c_e-\lambda c(t))-ic(t) \tag{19}$$

式中　c_e——交换层溶质浓度，mg/L

d_e——交换层厚度，cm

d_w——径流层厚度，cm

λ——径流层溶质进入交换层的迁移系数

q——径流率，L/min

e_r——土壤水进入径流的水通量

x——径流水平位移，cm

基于上述研究，为了深入研究雨滴击溅引起养分迁移的机制，GAO 等[60]基于质量平衡方程，提出了物理模型

$$\frac{\partial(hc(t))}{\partial t}+\frac{\partial(qc(t))}{\partial x}=e_s+e_d \tag{20}$$

式中　h——地表径流深度，cm

e_s——雨滴引起的溶质迁移率

e_d——扩散引起的溶质迁移率

WALLACH 等[79]假设土壤表面存在一个薄层控制着土壤与径流之间的养分迁移，养分的扩散率可以表示为

$$e_d=kC \tag{21}$$

式中　k——质量扩散系数，可以通过 WALLACH 等[79]提出的方法确定

降雨侵蚀过程中，每一个雨滴会引起土壤颗粒、土壤水进入地表径流。土壤侵蚀模型准确地描述了泥沙的侵蚀与在径流中的迁移过程。由雨强引起的击溅侵蚀表达式[60]

$$e=\alpha i^n \tag{22}$$

式中　n——经验常数，研究表明 n 通常取为 1[80-82]

雨滴击溅引起的养分迁移可以表示为

$$e_s=\frac{\alpha P\theta_o C}{\rho_b} \tag{23}$$

2.2.3　水流冲刷条件下的养分迁移模型

除了水流扩散、雨滴击溅等引起养分从地表进入径流的内在动力机制。坡面水流的冲刷作用也是一个不可忽视的作用。研究发现当水流沿坡面从坡顶流向坡底时，水流的剪切力剥离土壤表面颗粒，并将其带入地表径流，引起土壤养分流失。关于考虑水流冲刷作用对坡面养分迁移的影响，国内外学者进行了以下研究。

描述坡面水流冲刷条件下的养分迁移过程的方法很多，GAVINDARAJU[83]采用地面水流移动的边界条件概念，将分布式水文模型与非线性偏差分方程结合，并引入地表养分迁移模型描述坡面养分、水分的迁移过程。假设初始拟合条件下的混合层中的养分分布均匀，混合层的作用是将其中的养分分配到地表径流与混合层以下的土壤中，取决于各自的浓度梯度。混合层中的浓度随时间、空间而变化

$$\frac{\partial(c(t)h)}{\partial t}+\frac{\partial(qc(t))}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x}\left(Eh\frac{\partial c(t)}{\partial x}\right)=-k_1(c(t)-c_e) \tag{24}$$

$$\frac{\partial(\varepsilon c_e)}{\partial t}=k_1(c(t)-c_e)-k_2(c_1-c_e) \tag{25}$$

式中　E——雨滴击溅条件下的弥散和分子扩散

k_1、k_2——地表入渗率、混合层到地表以下入渗率的比例常数

c_1——混合层以下土壤中的养分浓度，mg/L

如图 3 所示[83]，假设上游的边界条件的入流量为零，上游移动的边界条件在瞬时点 D 处水深为零，侧向入流到河流中的水量是降雨、地表径流、入渗量的总和

$$Q=R(t)+Q\pm Q_s(t) \tag{26}$$

式中　$R(t)$——随时间变化的降雨量（正数为降雨，负数为蒸发）

Q——地表径流

$Q_s(t)$——入渗到土壤中的水量

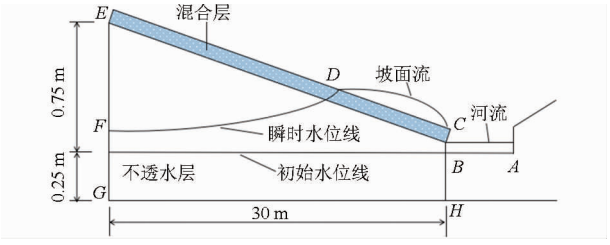

图 3　农田试验点边界条件及混合层概况描述图

Fig. 3　Description sketch of agricultural plot showing flow boundary conditions and mixing zone

侧向进入地表径流的节点有降雨、入渗总量的代数总和决定，代数表达式为

$$Q_0(x,t)=\begin{cases}i(x,t)-K(\psi)\left(\dfrac{\partial\psi(x,t)}{\partial z}+1\right) & (Q_0>0)\\ 0 & (Q_0\leqslant 0)\end{cases} \tag{27}$$

式中　$i(x,t)$——降雨强度

$\psi(x,t)$——地下土壤的毛管吸力

$Q_0(x,t)$——负值时没侧向流进入地表径流

DENG 等[84]假设养分在土壤表层活动区水平、垂直方向分布均匀。基于试验观察结果发现表面土壤活动区的养分浓度与同一体积含水率条件下的土壤养分在降雨前后浓度差值呈线性关系变化,如图 4 所示[84]。

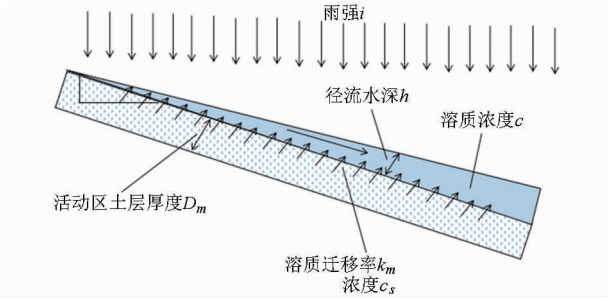

图 4 坡面水流冲刷条件下的养分迁移概念模型

Fig. 4 Conceptual model for nutrient transport under slop flow erosion condition

对流扩散方程为

$$\frac{\partial(c(t)h)}{\partial t}+\frac{\partial(c(t)vh)}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(Kh\frac{\partial c(t)}{\partial x}\right)+k_mD_m(c_s-c(t)) \tag{28}$$

其中 $D_m=\varepsilon h$

式中 K——垂直扩散率

D_m——混合厚度,cm ε——常数

c_s——土壤表层活动区的养分浓度

如果不考虑垂直扩散,$K=0$,则式(28)变为

$$\frac{\partial c(t)}{\partial t}+v\frac{\partial c(t)}{\partial x}=k_m\varepsilon(c_s-c(t))-(i-f)\frac{c(t)}{h} \tag{29}$$

令 $c=c\dfrac{Q_f}{Q_f}=\dfrac{C}{Q_f}$,$c_s=c_s\dfrac{Q_f}{Q_f}=\dfrac{C_s}{Q_f}$,则式(29)转换为

$$\frac{\partial C}{\partial t}+v\frac{\partial C}{\partial x}+Q_f\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{Q_f}\right)+v\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{Q_f}\right)\right)C=\varepsilon k_m(C_s-C)-\frac{(i-f)C}{h} \tag{30}$$

式(30)转换为

$$\frac{\partial C}{\partial t}+v\frac{\partial C}{\partial x}=EC_s-YC \tag{31}$$

其中 $E=\varepsilon k_m$ $Y=\dfrac{1-f}{h}+E+Q_f$

$$\overline{Q}_f=Q_f\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{Q_f}\right)+v\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{Q_f}\right)\right)$$

式(31)为坡面水流条件下养分迁移方程,尤其适用于中等坡度坡面水流空间变化条件下的养分迁移变化。另外,关键的是,模型提出土壤表层活动区的养分浓度是随时间呈指数衰减变化。即

$$C_s=C_0\exp(-\mu t) \tag{32}$$

式中 μ——常数,通过校正获得

式(32)的初始边界条件为

$$\begin{cases}C(x,0)=0 \text{ 且 } C_s(x,0)=C_0(x) & (0\leqslant x<L)\\ C(0,t)=0 & (0\leqslant t<\infty)\end{cases} \tag{33}$$

式中 C_0——养分从土壤进入地表径流的初始迁移率

DENG 等[84]提出了确定相应参数的方法,并用上述方法拟合坡面养分迁移过程与室内实测资料进行比较,结果较好。

3 土壤养分随地表径流迁移的控制措施研究

土壤养分流失过程错综复杂,而土壤中的养分通过径流进入地表水是农田养分流失的主要途径。对于山地丘陵地带,植被覆盖面积较少,土壤侵蚀伴随着地表径流而发生,使土壤中积累的养分随水流发生迁移。在人口密度大的区域,人类对土壤的作用相应强烈,土壤侵蚀也随之加重[85]。山地坡度对养分的流失也有明显的影响,土壤养分流失随坡长的增加呈指数增加趋势[86]。加之雨季集中降雨会导致土壤养分流失量增加,降雨会导致土壤养分含量降低,其中粒径小于 0.02 mm 的微团聚体和粒径小于 0.002 mm 的粘粒是养分流失的主要载体[87-88]。尤其是黄土高原地区土壤侵蚀严重、土壤肥力下降、养分流失等现象也日益严重。土壤养分的流失不仅造成土壤肥力退化,而且对人类生存的自然环境造成危害。因此,加强土壤侵蚀的治理是恢复生产条件,保持土壤肥力,减少农业面源污染的基本措施。

控制土壤侵蚀主要包括两个方面:改变上层土壤结构和坡面设计。通常借助施用有机肥、土壤改良剂、耕作措施、植被残留覆盖等增加上层土壤的渗透特性,以保持最大的水流渗透率,这是控制土壤侵蚀的方重要法,也是黄土高原控制养分流失的主要措施。增加土壤有机肥有助于稳固土壤结构、改善土壤通气性,减少径流、泥沙侵蚀的发生率。有机肥使土壤尤其沙土像一个能量库一样保水保肥[85],促进作物的生长。土壤改良剂对团聚体的稳定性、土壤孔隙分布有一定的影响。土壤改良剂的种类很多,PAGLIAI 等[89]和 ASGHARI[90]研究了部分改良剂对土壤孔隙以及保水特性的影响。还有一部分研究了天然有机改良剂和合成改良剂对砂土及砂壤土水分曲线形状的影响,结果表明水分特征曲线形状位置升高,与对照组比较土壤水分含水量增加。ASGHARI 等[90]分别研究了牛粪、蚯蚓粪、生物污泥以及 PAM 等土壤改良剂对土壤结构的影响,结果显

示较于其他改良剂，PAM 能够有效地改善砂壤土的物理特性，从而影响土壤对水分、养分的保持作用。耕作破坏土壤有机质结构，压实土壤，扰乱植物、动物群转化为有机碳，降低有机质、养分的含量及微生物、动物群体转化为团聚体。减少耕作可以有效地增加土壤大孔隙，进一步增加土壤含水率，影响土壤养分的流失[91-92]。土壤表面存在覆盖物及植被残渣降低土壤侵蚀，减少土壤蒸发，减缓雨滴对土壤表面的击溅作用，增加团聚体的稳定性。同时还增加有机碳池，调节土壤温度、湿度，影响土壤生物群落的分布。因此，通过将植被残留物返回土壤可以有效地改善土壤结构。

另一种方法为坡面设计，其目的在于控制水路，主要分为沿坡设畦、畦底设沟、沿坡设草带等措施。通过沿坡设畦，增加地面糙率，减缓水流，增加水分垂直入渗，降低水分携带泥沙量，防止土壤养分流失。研究表明在控制水路方面比较成功的方法是设立缓冲草带[85]。近 10 年以来，缓冲草带常用于阻止地表水引起的非点源污染，土壤坡面增加的缓冲草带可以吸附一部分土壤养分，上坡种植的植物可以使水路中的颗粒结合态养分截留下来，同时通过植被特别是快生物种吸收养分，从而有效地降低养分的流失量。缓冲草带的吸附容量取决于内在动力，因为水流运动是一个短暂的过程，而吸附却不是一个瞬时过程。需要强调的是缓冲草带的有效性随时间变化，截留的养分含量与带宽呈正比，植被的密度、种类、分布位置对降低水速、增加颗粒沉积有重要作用。除缓冲草带外，还可利用缓冲湿地和池塘减少农田磷素的流失，湿地比池塘更有效，因为前者的植被密度较大[84]。

不同于土壤侵蚀引起的养分迁移，水力作用也是引起养分迁移的主要动力。比如农田灌溉是产生土壤养分流失的原因之一，水稻耕作、暴雨冲刷等集中体现了土壤养分向水体迁移的过程。以磷元素为例，土壤中的磷进入水体引起水生环境富营养化的关键还是水体本身。灌溉水中的磷素含量可以反映土壤中磷素累积情况，因此可通过灌溉水中磷素指标控制灌水量从而控制土壤磷素的流失（基于提高水分利用效率，减少田间细流产生的灌溉制度）。此外，降雨季节注意施肥时间和方法，加强河流特殊河段的磷素含量及形态的监测[85]。

不同的养分形态防治治理措施不同。比如农田面源污染中，对于氮、磷污染管理的措施有很多限制。HEATHWAITE 等[93]发展了一套氮素污染源划分标准，其基本指导思想与 GBUREK[94]的磷素污染源等级划分标准相似，是综合了污染源和流失路径两种因素，计算公式为

$$N_I = E_s E_p \sum (E_c M) \tag{34}$$

式中　E_s——结构等级评价

E_p——渗透性评价

E_c——源特性评价

M——污染物质量

由此推出源头 $N_I < 3$、$N_I = 3 \sim 8$、$N_I = 9 \sim 18$、$N_I > 18$ 时，分别为难、中等、易、极易流失区域。将 P_I 和 N_I 联合运用综合治理农业面源污染，从理论与实践角度考虑是可行的。其核心思想是切断污染源与流失路径之间的联系，两者之间的联合不是简单的加和，而应该认真分析二者之间的交互作用[85]。氮的作用区域比磷的作用区域广，因此对氮的控制要全流域监测，而对磷的治理则集中在易流失区域。我国农业面源污染问题比较严重突出，目前对于农业污染的管理方式大都停留在肥料的管理上。养分迁移引起的面源污染随时间空间变化情况复杂，影响因素较多。为了更准确地划分养分污染等级、控制养分流失，需要借助计算机辅助决策模型进行预测评估，而各种数学模型发展耦合是未来的研究方向，需要进行大量而深入的研究工作。

4　进一步需要研究问题

目前国内外学者从机理、数学模型、控制措施等方面对坡面养分迁移进行了研究，指出多种因素对坡面养分迁移的影响作用，揭示了引起坡面养分迁移的内在动力传递机制。从目前的研究来看，对坡面养分迁移机制认识需要进一步深化，仍有一些问题需要解决：

（1）目前研究表明坡面养分迁移过程受到多种因素的影响，然而每一种因素对坡面养分的迁移过程的作用程度没有评价标准。而且缺乏一个综合评价各种影响因素的指标来判断坡面养分的流失量以及采用相关的控制措施。

（2）坡面养分随地表径流迁移伴随着水分、泥沙的迁移过程。目前存在的模型很少考虑土壤侵蚀的作用，大部分将其归于有效参数，需要提出一种模型考虑土壤侵蚀过程对坡面养分迁移的影响。

（3）基于混合层理论的数学模型作为研究坡面养分迁移的基础理论模型应用广泛。研究发现混合层随时间而变化，然而目前的研究中通常将混合层深度作为一个常数，或者简单地表示为几种影响因素的函数。关于混合层深度的变化过程需要进一步研究。

（4）坡面养分迁移过程是分子扩散、雨滴击溅、水流冲刷综合作用的结果，为了完整揭示坡面养分

迁移内在机制,需要综合考虑各种内在动力机制,建立综合各种内在动力机制的数学模型预测坡面养分的流失过程。

(5)目前各种模型建立都是在假定某一物理过程而建立的,但对于这种假定的合理性和真实性缺乏直接试验测定,大都利用径流浓度或流失量间接评估,需要发展直接评价模型假定合理性的试验方法。同时,目前模型大都针对一场降雨,需要发展可以预测不同时间长度的模型,如可预测一场、一个月或一年内土壤养分流失模型。

(6)目前研究主要集中在坡地上,对于流域和区域尺度预测分析模型有待深入研究,发展预测分析区域或流域尺度土壤养分流失模拟模型,为区域养分流失控制提供有效手段。

(7)根据土壤养分流失机制和地区自然条件与农业生产和生态环境建设状况,需要发展适合不同类型地区特点的土壤养分流失控制措施,以及养分流失预警系统。

5 结束语

坡面养分迁移是一个复杂的物理化学过程,受到多种因素的影响,如降雨特征、土壤特性、坡面特征、化学物质特征、耕作与施肥方式、地表覆盖及管理控制措施等。对于坡面养分迁移过程的预测及评价从经验模型发展到基于物理过程的数学模型。坡面养分迁移的内在动力机制大致可以概括为混合层理论、分子扩散理论、雨滴击溅以及水流冲刷等作用。然而,坡面养分迁移过程是一个多种因素混合作用的结果,目前缺乏综合评价各种影响因子对坡面养分迁移作用的指标,以及综合考虑多种内在动力机制的数学模型。因此,仍需对坡面养分迁移过程进行大量研究,量化各种影响因子对养分迁移的作用,提出综合体现各种影响因子的评价指标及物理模型,用于指导农业生产及流域管理。

参 考 文 献

1 王全九,王辉,郭太龙. 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征与数学模型[M]. 北京科学出版社, 2010.

2 王全九, 沈冰, 王文焰. 降雨动能对溶质径流过程影响的实验研究[J]. 西北水资源与水工程, 1998(1): 17 - 21.
WANG Quanjiu, SHEN Bing, WANG Wenyan. The study of the effect of rainfall kinetic energy on solute runoff process[J]. Northwest Water Resources and Water Engineering, 1998(1): 17 - 21. (in Chinese)

3 SNYDER J K, WOOLHISER D A. Effect of infiltration on chemical transport into overland flow[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(5): 1457 - 1470.

4 FLANAGAN D C, FOSTER G R, STORM P. Effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 535 - 544.

5 GAO Z, CHAE N, KIM J, et al. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature, and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model Ⅱ[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D6): 102 - 106. (in Chinese)

6 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 39 - 46.
LI Yuyuan, SHAO Ming'an, ZHENG Jiyong, et al. The study of rain intensity on the characteristic of phosphorus runoff from loessal soil[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 39 - 46. (in Chinese)

7 田坤, 王光谦, 田鹏, 等. 降雨-径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 81 - 87.
TIAN Kun, WANG Guangqian, TIAN Peng, et al. The simulation of soil solute transport under rainfall-runoff condition[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 81 - 87. (in Chinese)

8 郭太龙, 王全九. 黄土坡面土壤侵蚀中溶质随径流迁移的水动力特性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 5(5): 17 - 21.
GUO Tailong, WANG Quanjiu. The study of hydrodynamic characteristic of solute transport in runoff during soil erosion along loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 5(5): 17 - 21. (in Chinese)

9 PARR A D, RICHARDSON C P, LANE D D, et al. Pore water uptake by agricultural runoff[J]. Journal of Environmental Engineering, 1987, 113(1): 49 - 63.

10 RICHARDSON C P, PARR A D. Modify Fickian model by solute uptake runoff[J]. Journal of Environmental Engineering, 1988, 114(4): 792 - 809.

11 BEASLEY D B, HIGGINS L F, MONK E J. ANSWERS: model for watershed planning[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(4): 938 - 944.

12 WALTON R S, VOLKER R E, BRISTOW K L, et al. Solute transport by surface runoff from low-angle slopes: theory and application[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(6): 1139 - 1158.

13 MOORE D C, SINGER M J. Crust formation effect on soil erosion processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(4): 1117 - 1123.

14 晏维金, 章申, 吴淑安, 等. 模拟降雨条件下生物可利用磷在地表径流中的流失和预测[J]. 环境化学, 1999, 18(6): 497 - 506.
YAN Weijin, ZHANG Shen, WU Shu'an, et al. Loss and prediction of bio available phosphorus in surface runoff under simulated rainfall condition[J]. Environmental Chemistry, 1999, 18(6): 497 - 506. (in Chinese)

15 董广辉，夏正楷. 土壤侵蚀与土壤肥力[J]. 水土保持研究，2003，10(3)：80－82.
DONG Guanghui，XIA Zhengkai. Soil erosion and soil fertility[J]. Research on Soil and Water Conservation，2003，10(3)：80－82.（in Chinese）

16 王丽，王力，王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报，2014，33(11)：2171－2178.
WANG Li，WANG Li，WANG Quanjiu. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment and nitrogen and phosphorus losses from slope cropland[J]. Journal of Agro-Environment Science，2014，33(11)：2171－2178.（in Chinese）

17 VOLKER R W. Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes[J]. Journal of Hydrology，2000，233(1)：19－36.

18 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用[J]. 地理研究，1996，15(3)：57－62.
JIN Changxing. The effect of slope on slope erosion[J]. Geographic Research，1996，15(3)：57－62.（in Chinese）

19 唐克丽，张科利，雷阿林. 黄土丘陵区退耕上线的研究论证[J]. 科学通报，1998，43(2)：200－203.
TANG Keli，ZHANG Keli，LEI Alin. Research and demonstration on the grain for farmland in Loess Hilly Region[J]. Science Bulletin，1998，43(2)：200－203.（in Chinese）

20 刘青泉，陈力，李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学，2001，22(5)：449－457.
LIU Qingquan，CHEN Li，LI Jiachun. The analysis of the effect of slope on soil erosion on slope land[J]. Applied Mathematics and Mechanics，2001，22(5)：449－457.（in Chinese）

21 孔刚，王全九，樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报，2007，21(3)：14－18.
KONG Gang，WANG Quanjiu，FAN Jun. The experimental study on the effect of slope on loess slope solute transport[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2007，21(3)：14－18.（in Chinese）

22 王辉. 降雨条件下黄土坡地养分迁移机理及模拟模型[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2006.
WANG Hui. Mechanism and simulation model of nutrient transport on Loess Slope under rainfall conditions[D]. Yangling：Northwest Agriculture and Forestry University，2006.（in Chinese）

23 王辉，王全九，邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报，2006，22(6)：39－44.
WANG Hui，WANG Quanjiu，SHAO Ming'an. Experiment on nutrient runoff and runoff of loess slope under artificial rainfall[J]. Transactions of the CSAE，2006，22(6)：39－44.（in Chinese）

24 王全九，穆天亮，王辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J]. 干旱地区农业研究，2009，27(4)：176－179.
WANG Quanjiu，MU Tianliang，WANG Hui. Effect of slope gradient on runoff solute transport characteristics of loess slope[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2009，27(4)：176－179.（in Chinese）

25 董文财. 黄土高原坡面养分径流流失模拟研究[D]. 杨凌：中国科学院研究生院（教育部水土保持与生态环境研究中心），2012.
DONG Wencai. Simulation of soil nutrient runoff loss on the Loess Plateau[D]. Yangling：Water and soil conservation and ecological environment research center，Graduate University of Chinese Academy of Sciences，2012.（in Chinese）

26 李君兰，蔡强国，孙莉英，等. 降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J]. 中国水土保持科学，2011，9(6)：8－13.
LI Junlan，CAI Qiangguo，SUN Liying，et al. The analysis of interaction effect of rain intensity，slope and slope length on rill erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation in China，2011，9(6)：8－13.（in Chinese）

27 AHUJA L R，ROSE J R. Interflow of water through a sloping soil with seepage face[J]. Soil Science Society of America Journal，1982，46(2)：245－250.

28 刘秉正，李光录，吴发启，等. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. 水土保持学报，1995，9(2)：77－86.
LIU Bingzheng，LI Guanglu，WU Faqi，et al. Soil nutrient loss in the south of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation，1995，9(2)：77－86.（in Chinese）

29 白红英，唐克丽，陈文亮，等. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J]. 水土保持通报，1991，11(3)：14－19.
BAI Hongying，TANG Keli，CHEN Wenliang，et al. Research on the process of soil erosion and nutrients loss on slope land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，1991，11(3)：14－19.（in Chinese）

30 查轩，唐克丽，张科利，等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报，1992，6(2)：52－59.
ZHA Xuan，TANG Keli，ZHANG Keli，et al. Effects of vegetation on soil properties and soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation，1992，6(2)：52－59.（in Chinese）

31 张亚丽，张兴昌，邵明安. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报，2004，18(1)：85－88.
ZHANG Yali，ZHANG Xingchang，SHAO Ming'an. Effects of straw cover on soil mineral nitrogen loss of loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2004，18(1)：85－88.（in Chinese）

32 GUO T L，WANG Q J，LI D Q，et al. Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid loess region of northwestern China[J]. Journal of Soil Sediment，2010，10(6)：1200－1208.

33 张兴昌，邵明安，黄占斌. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报，2000，20(6)：1038－1044.
ZHANG Xingchang，SHAO Ming'an，HUANG Zhanbin. Effects of different vegetation on soil erosion and nitrogen loss[J]. Acta Ecologica Sinica，2000，20(6)：1038－1044.（in Chinese）

34 张兴昌,刘国彬,付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学,2000,21(6):16 - 19.
ZHANG Xingchang, LIU Guobin, FU Huifang. Effects of different vegetation coverage on nitrogen runoff loss in river basin[J]. Environmental Science, 2000,21(6): 16 - 19. (in Chinese)

35 王辉, 王全九, 邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3):10 - 13.
WANG Hui, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an. Effects of surface soil bulk density on nutrients runoff on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 10 - 13. (in Chinese)

36 李鹏,李占斌,郑良勇. 植被保持水土有效性研究进展[J]. 水土保持研究,2002, 9(2):76 - 80.
LI Peng, LI Zhanbin, ZHENG Liangyong. Research progress on soil and water conservation of vegetation[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2002, 9(2): 76 - 80. (in Chinese)

37 李鹏,崔文斌,郑良勇. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]. 中国水土保持科学,2006, 2(1): 55 - 59.
LI Peng, CUI Wenbin, ZHENG Liangyong. Mechanism of herbaceous vegetation cover structure on runoff erosion dynamics[J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2006, 2(1): 55 - 59. (in Chinese)

38 REID K D, WILCOX B P, BRESHEARS D D. Runoff and erosion in a piñon-juniper woodland influence of vegetation patches [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6): 1869 - 1879.

39 张亚丽. 黄土坡面土壤氮磷等化学物质径流迁移与混合层深度研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
ZHANG Yali. The study of soil nitrogen phosphorus and other chemical substance runoff transfer and mixing depth on loess slope [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)

40 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 23 - 27.
WANG Sheng, WANG Quanjiu, DONG Wencai, et al. Runoff and sediment yield and nutrient loss under different vegetation coverage on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 23 - 27. (in Chinese)

41 王辉, 王全九, 邵明安. 聚丙烯酰胺(PAM)对不同土壤坡地水分养分迁移过程的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 86 - 89.
WANG Hui, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an. Effects of PAM on soil water and nutrients on different slope gradient[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(2): 86 - 89. (in Chinese)

42 张长保, 王全九, 樊军, 等. 模拟降雨下 PAM 对砂黄土养分迁移影响实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008,27(1): 82 - 85.
ZHANG Changbao, WANG Quanjiu, FAN Jun, et al. Experiment study on the effects of PAM on nutrients transport in sandy loess soil under simulated rainfall[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008,27(1): 82 - 85. (in Chinese)

43 DONG W C, WANG Q J. Modeling soil solute release into runoff and transport with runoff on a loess slope[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 18(5): 527 - 535.

44 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究入渗[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 178 - 185.
TANG Zejun, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Simulation test study on the increase of soil rainfall infiltration by polyacrylamide[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 178 - 185. (in Chinese)

45 刘艳丽, 周蓓蓓, 王全九, 等. 纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 21 - 25.
LIU Yanli, ZHOU Beibei, WANG Quanjiu, et al. The effect of nano carbon on the loess soil water movement and solute transport characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 21 - 25. (in Chinese)

46 傅伯杰, 马克明, 周华峰. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(22): 2444 - 2448.
FU Bojie, MA Keming, ZHOU Huafeng. Effect of land use structure on soil nutrient distribution in Loess Hilly Region[J]. Science Bulletin, 1998, 43(22): 2444 - 2448. (in Chinese)

47 邓红兵, 王庆礼. 三峡库区小集水区复合生态系统的水分及养分动态[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(5): 432 - 439.
DENG Hongbing, WANG Qingli. Dynamics of water and nutrient recombination ecosystem of small watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2001, 10(5): 432 - 439. (in Chinese)

48 何园球, 王兴祥, 胡锋, 等. 红壤丘岗区人工林土壤水分、养分流失动态研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 91 - 93.
HE Yuanqiu, WANG Xingxiang, HU Feng, et al. Study on soil moisture and nutrient loss of artificial forest in hilly region of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 91 - 93. (in Chinese)

49 孟庆华, 傅伯杰, 邱扬. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式的径流及磷流失研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12(4): 393 - 397.
MENG Qinghua, FU Bojie, QIU Yang. Study on different land use pattern on runoff and phosphorus in hilly gully region of the Loess Plateau [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(4): 393 - 397. (in Chinese)

50 陈磊, 李占斌, 李鹏, 等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增刊 1): 170 - 176.
CHEN Lei, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Coupling study of soil and water loss and soil nutrient loss under field simulated rainfall [J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2011, 19(Supp. 1): 170 - 176. (in Chinese)

51 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 188 - 198.
YUAN Donghai, WANG Zhaoqian, CHEN Xin, et al. Effects of different use pattern on nitrogen and phosphorus loss characteristic of red loam in small river basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 188 - 198. (in Chinese)

52 钱婧，张丽萍，王小云，等. 人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J]. 水土保持学报，2012，26(5)：6－10.
QIAN Jing，ZHANG Liping，WANG Xiaoyun，et al. Effects on different slope length and coverage on nitrogen loss under rainfall simulation condition[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2012，26(5)：6－10.（in Chinese）

53 POTE D，DANIEL T，MOORE P，et al. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff[J]. Soil Science Society of America Journal，1996，60(3)：855－859.

54 BAKER J L，LAFLEN J M，JOHNSON H P. Effect of tillage systems on runoff losses of pesticides：a rainfall simulation study[J]. Transactions of the ASAE，1978，21(5)：886－892.

55 BAKER J L，LAFLWN J M，HARTWIG R O. Effects of corn residue and herbicide placement on herbicide runoff losses[J]. Transactions of the ASAE，1982，25(2)：340－343.

56 MENZEL R G，RHOADES E D，OLNESS A E，et al. Variability of annual nutrient and sediment discharges in runoff from Oklahoma cropland and rangeland[J]. Journal of Environmental Quality，1978，7(3)：401－406.

57 HUBBARD R K，ERICKSON A E，ELLIS B G，et al. Movement of diffuse source pollutants in small agricultural watersheds of the Great Lakes Basin[J]. Journal of Environmental Quality，1982，11(1)：117－123.

58 MCDOWELL L L，WILLIS G H，MURPHREE C E. Plant nutrient yields in runoff from a Mississippi delta watershed[J]. Transactions of the ASAE，1984，27(4)：1059－1066.

59 AHUJA L R，SHARPLEY A N，YAMAMOTO M，et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determining ^{32}P [J]. Water Resources Research，1981，17(4)：969－974.

60 GAO B，WALTER M T，STEENHUIS T S，et al. Investigating ponding depth and soil detachability for a mechanistic erosion model using a simple experiment[J]. Journal of Hydrology，2003，277(1)：116－124.

61 WALLACH R，JURY W A，SPENCER W F. The concept of convective mass transfer for prediction of surface-runoff pollution by soil surface applied chemicals[J]. Transactions of the ASAE，1989，32(3)：906－912.

62 AMER F，BOULDEN D R，BALCK C A，et al. Characterization of soil phosphorous by anion exchange resin and ^{32}P equilibration[J]. Plant Soil，1955，6(4)：391－459.

63 KUO S E L. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite[J]. Soil Science，1973，116(6)：400－408.

64 CHIEN S H，CLAYTON W R. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils[J]. Soil Science Society of American Journal，1980，44(2)：265－268.

65 SHARPLEY A M R，SMITH S. The sorption of soluble phosphorus by soil material during transport in runoff from cropped and grassed watersheds[J]. Journal of Environmental Quality，1981，10(2)：211－215.

66 VADAS P A，OWENS L B，SHARPLEY A N. An empirical model for dissolved phosphorus in runoff from surface-applied fertilizers[J]. Agricultural Ecological Environment，2008，127(1)：59－65.

67 DONIGIAN A S. Agricultural runoff management（ARM）model version II：refinement and testing[R]. EPA 60013－77－098，Environmental Research Laboratory，US Environmental Protection Agency，1977.

68 FRERE M H，ROSE J D，LANE L J. A field scale model for chemicals runoff and erosion from agricultural management systems[R]. Model Documentation. Vol. 1. USDA，Conservation Research Report 1980，26：65－86.

69 DEFERSHA M B，MELESSE A M. Effect of rainfall intensity，slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio[J]. CATENA，2012，90：47－52.

70 LÓPEZ-TARAZÓN J A，BATALLA R J，VERICAT D，et al. Runoff and sediment transport relations in a mesoscale mountainous catchment：the river isúbena（ebro basin）[J]. CATENA，2010，82(1)：23－34.

71 SNYDER J K，WOOLHISER D A. Effects of infiltration on chemical transport into overland flow[J]. Transactions of the ASAE，1985，28(5)：1450－1457.

72 AHUJA L R，LEHMAN O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. Journal of Environmental Quality，1983，12(1)：34－40.

73 王全九，王辉. 黄土坡面土壤溶质随径流迁移有效混合深度模型特征分析[J]. 水利学报，2010，41(6)：671－676.
WANG Quanjiu，WANG Hui. Analysis of effective mixing depth models of soil solute transport in loess slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2010，41(6)：671－676.（in Chinese）

74 DONG W C，WANG Q J，ZHOU B B. A simple model for the transport of soil-dissolved chemicals in runoff by raindrops[J]. CATENA，2013，101：129－135.

75 WALTER M T，GAO B，PARLANGE J. Modeling soil solute release into runoff with infiltration[J]. Journal of Hydrology，2007，347(3)：430－437.

76 YANG T，WANG Q J，XU D，et al. A method for estimating the interaction depth of surface soil with simulated rain[J]. CATENA，2015，124：109－118.

77 AHUJA L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process[J]. Soil Science Society of American Journal，1990，54(2)：312－321.

78 HAIRSINE P B，ROSE C W. Rainfall detachment and deposition：sediment transport in the absence of flow-driven processes[J]. Soil Science Society of American Journal，1991，55(2)：320－324.

79 WALLACH R, JURY W A, SPENCER W F. Transfer of chemicals from soil solution to surface runoff: a diffusion-based soil model[J]. Soil Science Society of American Journal, 1988, 52(3): 612 - 618.
80 SHARMA P P, GUPTA S C, FOSTER G R. Predicting soil detachment by raindrops[J]. Soil Science Society of American Journal, 1993, 57(3): 674 - 680.
81 SHARMA P P, GUPTA S C, FOSTER G R. Raindrop-induced soil detachment and sediment transport from interrill areas[J]. Soil Science Society of American Journal, 1995, 59(3): 727 - 734.
82 JAYAWARDENA A W, BHUIYAN R R. Evaluation of an interrill soil erosion model using laboratory catchment data[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(1): 89 - 100.
83 GOVINDARAJU R S. Modeling overland flow contamination by chemicals mixed in shallow soil horizons under variable source area hydrology[J]. Water Resources Research, 1996, 32(3): 753 - 758.
84 DENG Z Q, DE LIMA J L M P, SINGH V P. Transport rate-based model for overland flow and solute transport: parameter estimation and process simulation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1): 220 - 235.
85 王道涵, 梁成华. 农业磷素流失途径及控制方法研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 183 - 188.
WANG Daohan, LIANG Chenghua. Research progress on ways and control method of agricultural phosphorus loss[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 183 - 188. (in Chinese)
86 王百群. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响[J]. 土壤侵蚀与水土流失学报,1999, 5(2): 18 - 22.
WANG Baiqun. Effect of topography on soil nutrient loss of sloping land in loess hilly region[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Loss, 1999, 5(2): 18 - 22. (in Chinese)
87 黄丽. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998, 4(1): 8 - 13.
HUANG Li. Experimental study on nutrient loss of purple soil in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Loss, 1998, 4(1): 8 - 13. (in Chinese)
88 BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1): 3 - 22.
89 PAGLIAI M, VIGNOZZI N, PELLEGRINI S. Soil structure and the effect of management practices[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(2): 131 - 143.
90 ASGHARI S. Effect of four organic soil conditioners on pore size distribution, aggregate stability, hydraulic and solutes transport parameters in a sandy loam soil[D]. Tabriz: Tabriz University, 2009.
91 ABBASI F, SIMUNEK J, FEYEN J, et al. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 1085 - 1095.
92 ASGHARI S, ABBASI F, NEYSHABOURI M R. Effects of soil conditioners on physical quality and bromide transport properties in a sandy loam soil[J]. Biosystem Engineering, 2011, 109(1): 90 - 97.
93 HEATHWAITE L, SHARPLEY A, GBUREK W, et al. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales[J]. Journal of the Environmental Quality, 2000, 29(1): 158 - 166.
94 GBUREK W J, SHARPLEY A N, HEATHWAITE L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 130 - 144.

(上接第 66 页)

20 张凯鑫,张衍林,周波,等. 果园运输机单轨道橡胶辊驱动装置驱动性能研究[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊 2):112 - 114.
ZHANG Kaixin, ZHANG Yanlin, ZHOU Bo, et al. Driving performance of single track rubber roller driving device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):112 - 114. (in Chinese)
21 张俊峰,张衍林,张唐娟,等. 遥控牵引式单轨运输机的设计与改进[J]. 华中农业大学学报,2013,32(3):131 - 133.
ZHANG Junfeng, ZHANG Yanlin, ZHANG Tangjuan, et al. Design and improvement of the remote control traction monorail transporter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(3): 131 - 133. (in Chinese)
22 赵建柱,王枫辰,于斌,等. 农用仿形履带式动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(9):21 - 24.
ZHAO Jianzhu, WANG Fengchen, YU Bin, et al. Research on all-terrain profiling crawler power chassi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):21 - 24. (in Chinese)
23 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1988:923 - 925.
24 张青,张瑞军. 工程起重机结构与设计[M]. 北京:化学工业出版社,2008:98 - 103.
25 邬备,王德成,王光辉,等. 小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(7):124 - 127.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):124 - 127. (in Chinese)