

填闲玉米对京郊设施菜地土壤氮素淋洗影响的模拟分析

梁 浩¹ 胡克林² 侯 森² 邹国元³ 王 磊¹

(1. 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;
3. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要: 在北京郊区开展了 3 a (2008—2010 年) 的田间试验, 在前茬蔬菜 3 种施肥处理 (CK, 不施肥; N1, 施 N 380 kg/hm²; N2, 施 N 260 kg/hm²) 的基础上, 在夏季休闲期分别在 N1 和 N2 处理上增设了甜玉米种植处理, 即 N1C 和 N2C, 以探讨填闲作物种植对京郊设施菜地夏季敞棚期氮素淋失的阻控作用。利用田间系统观测数据对土壤-作物系统水氮管理模型 WHCNS 进行了校验, 并对设施菜地夏季休闲期土壤水氮平衡及氮素淋洗进行了模拟分析。结果表明, 休闲处理的水分消耗项主要是蒸发和渗漏, 而填闲处理的水分消耗项主要是蒸腾和渗漏, 各处理水分渗漏量由大到小依次为: CK、N1、N2、N1C、N2C, 甜玉米的种植提高了土壤水分的上行通量, 减少了近 42% 的水分渗漏量。休闲处理的水分平衡均值为正, 而填闲处理的水分平衡为负, 说明甜玉米的种植消耗了土体储存的水分。硝态氮淋洗量由大到小依次为: N1、N2、CK、N1C、N2C, 填闲处理的氮素淋洗量范围为 1.3 ~ 50.9 kg/hm², 远低于施肥处理的 59.2 ~ 273.6 kg/hm², 甚至低于不施肥处理的 38.6 ~ 151.6 kg/hm², N1C 和 N2C 处理的氮素淋洗量分别比 N1 和 N2 处理降低 80% 和 85%。因此, 在夏季选择深根系的甜玉米作为填闲作物, 对硝态氮的淋洗有明显的阻控作用, 是降低土壤硝态氮淋失风险最直接有效的措施之一。

关键词: 玉米; 设施蔬菜; 填闲作物; 水氮模型; 水分渗漏; 硝酸盐淋失

中图分类号: S152; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0125-12

Simulation Analysis of Effect of Planting Summer Catch Crop Sweet Corn on Nitrate Leaching for Greenhouse Vegetable Field in Suburbs of Beijing

Liang Hao¹ Hu Kelin² Hou Sen² Zou Guoyuan³ Wang Lei¹

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to reduce the effect of intensive rainfall on nitrate leaching in summer for greenhouse vegetable field in North Plain China, a three-year (2008—2010) field experiment was conducted in the suburbs of Beijing during the period of intensive rainfall season from July to September. Five different treatments were designed, including three nitrogen fertilizer levels (CK, no nitrogen fertilizer; N1, 380 kg/hm² and N2, 260 kg/hm² of nitrogen) in previously grown crop, and two other treatments with and without sweet corn as a catch crop based on the treatments of N1 and N2, denoted by N1C and N2C, respectively. The three-year field observed data was used to calibrate and validate the WHCNS (soil water heat carbon nitrogen simulator) model, and subsequently nitrate leaching, and water and nitrogen balance of different treatments were simulated. The results showed that evaporation and drainage were two main pathways of water consumption for the fallow treatments, while the main pathway of catch crop treatments was evapotranspiration and drainage. The amount of water drainage was in the order of CK >

收稿日期: 2015-12-14 修回日期: 2016-01-27

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201000314)和农业部植物营养与肥料重点实验室开放基金项目(IARRP-2014-36)

作者简介: 梁浩(1989—), 男, 博士生, 主要从事资源环境系统模型研究, E-mail: checkmyself@qq.com

通信作者: 胡克林(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤空间变异及溶质运移研究, E-mail: hukel@cau.edu.cn

$N1 \approx N2 > N1C > N2C$. Planting sweet corn can reduce nearly 42% of water drainage compared with without catch crop treatments. The water balance for fallow treatments was positive, and it was negative for the catch crop treatments, which indicated that the sweet corn consumed soil water stored in soil profile. The order of nitrate leaching rate of different treatments was $N1 > N2 > CK > N1C > N2C$, and the mass of nitrate leaching for catch crop treatments ranged from 1.3 kg/hm² to 50.9 kg/hm², which was much lower compared with those of N1 and N2 treatments (59.2 ~ 273.6 kg/hm²), and even lower than that of the CK treatment (38.6 ~ 151.6 kg/hm²). The catch crop reduced 80% and 85% of nitrate leaching compared with treatments of N1 and N2, respectively. It can be concluded that using the deep-rooted sweet corn as a catch crop in summer can delay and control the nitrate leaching. Therefore, it can be used as an efficient method to reduce the risk of nitrate leaching for greenhouse vegetable field in the North China Plain.

Key words: corn; greenhouse vegetable; catch crop; water and nitrogen model; water drainage; nitrate leaching

引言

温室栽培以其不受季节限制的独特种植模式和高效益产出,近年来在中国农业种植体系中得到迅速发展^[1]。调查发现农民为了提高蔬菜产量通常施用过量的氮肥,在华北平原地区温室栽培一年三季总氮肥投入量普遍达 1 000 kg/hm² 以上^[2-4],由于氮素利用率较低,土壤硝态氮残留量较大^[5-6],对浅层地下水带来的硝酸盐污染风险逐年加剧。已在华北平原多地发现温室菜田较粮田周围地下水污染更为严重,普遍高于世卫组织饮用地下水硝酸盐含量标准值的数倍^[4,7]。

在我国华北地区雨季主要集中在夏季(6—9 月份),此时大部分温室处于敞棚休闲状态,由于温室土壤往往残留较多的硝态氮,而当降水量高于蒸发量时土壤中易形成硝态氮淋失环境^[8-10],因此夏季敞棚休闲期已成为我国北方设施菜地土壤硝态氮淋失的重要时期。大量研究表明,填闲作物可以有效地降低土壤水分渗漏和硝酸盐淋洗^[11-19],如 PLAZA-BONILLA 等^[16]使用 STICS 模型模拟了不同豆科填闲作物对水氮的影响,发现豆科填闲作物能够降低土壤水分渗漏和硝酸盐淋洗。THOMSEN^[18]在丹麦对非豆科填闲作物的研究发现,非豆科作物可以显著减少硝酸盐淋洗。TONITTO 等^[19]通过元分析方法发现无论是豆科作物还是非豆科作物,都能够有效地降低土壤硝酸盐淋洗。由于气象和土壤条件的不同导致作物对水分氮素吸收的差异,而土壤氮素转化和迁移过程是一个非常复杂的过程,传统的田间实测法很难满足实际分析的需要,模型模拟的方法则提供了一种量化填闲甜玉米对土壤水氮平衡及氮素淋洗影响的方法,目前我国在这方面的研究较少。

理想的填闲作物应在较短的生育期内迅速生长,并具有生物量大、根系深等特点^[20]。对于北方日光温室种植体系而言,由于土壤中无机氮残留较高,选择非豆科植物作为填闲作物较为合适。此外,作物的生长特性与气候条件的吻合性也是决定填闲作物能否发挥其最大氮素挖掘潜力的一个重要因素。华北平原夏季高温、高光强,适合 C4 植物的生长,前人研究表明甜玉米由于生长期短,扎根较深,适合作为北方温室种植体系中的填闲作物^[21]。

本文以京郊设施菜地 3 a(2008—2010 年)的田间试验数据为基础,使用最近开发的土壤-作物-大气系统水热碳氮耦合模拟模型 WHCNS(Soil water heat carbon and nitrogen simulator)^[22] 量化研究夏季休闲期甜玉米种植对土壤水氮平衡和硝态氮淋失的影响,并评价其对土壤氮素淋失的阻控效果,为减少设施菜地硝态氮的淋失提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2008 年 7 月—2010 年 9 月在北京市房山区韩村河农业技术开发中心温室内进行(39°36′ N、115°56′ E,海拔高度为 51 m),该地区为暖温带半湿润大陆型季风气候,多年平均气温 11℃,年平均降水量 635 mm,主要集中在 6—9 月份,占全年的 76%。地下水水位在 17 ~ 22 m 之间。试验地为种植年限在 10 a 以上的温室菜地,每年种植 3 茬蔬菜,夏季(6—9 月份)开棚休闲。土壤类型为褐土,耕层土壤基本理化性质为:pH 值 7.81、有机质 53.97 g/kg、全氮 3.35 g/kg、速效磷 178.8 mg/kg 和速效钾 629.5 mg/kg,实测土壤剖面基本物理和水力学特征参数如表 1 所示。

表 1 土壤剖面物理及水力学特性参数
Tab.1 Soil physical and hydraulic properties for soil profile

深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	颗粒质量分数/%			质地 (USDA)	θ_r / (cm ³ ·cm ⁻³)	θ_s / (cm ³ ·cm ⁻³)	α / cm ⁻¹	n	K_s / (cm·d ⁻¹)
		砂粒	粉粒	粘粒						
0~20	1.34	41.2	45.5	13.3	壤土	0.048	0.389	0.010 1	1.582	22.1
20~60	1.58	37.5	53.2	9.3	粉壤土	0.046	0.394	0.012 2	1.528	19.1
60~80	1.57	45.6	43.3	11.1	壤土	0.040	0.389	0.015 3	1.436	15.6
80~100	1.52	38.1	52.6	9.3	粉壤土	0.042	0.381	0.016 5	1.518	28.5
100~150	1.61	46.2	42.5	11.3	壤土	0.048	0.385	0.012 5	1.472	15.4
150~180	1.63	44.6	44.7	10.7	壤土	0.049	0.382	0.009 2	1.511	7.6

注： θ_r 是残余含水率， θ_s 是饱和含水率， α 是进气值的倒数， n 是孔隙分布指数， K_s 是饱和导水率。

1.2 试验设计与测定项目

在 2008 年试验开展之前,设施菜地均采用当地习惯施肥。从 2008 年开始该设施菜地设有 3 个肥料处理:不施肥(CK)、当地习惯施肥(N1,施 N 380 kg/hm²)和优化施肥处理(N2,施 N 260 kg/hm²)。在夏季休闲期除了选取前茬试验中的 3 个肥料处理(CK、N1 和 N2)作为试验处理外,另外增设 2 个填闲甜玉米种植处理,即分别在 N1 和 N2 处理中进行裂区试验,单设甜玉米种植处理,记为 N1C 和 N2C。每个处理 3 次重复,小区面积为 6.5 m×4.0 m,随机排列。3 a 的试验时间分别为 2008 年 7 月 22 日—9 月 30 日、2009 年 7 月 16 日—9 月 27 日及 2010 年 7 月 16 日—9 月 29 日,甜玉米品种均为“京科甜 183”,每年试验开始前甜玉米在温室进行育苗,试验开始时移栽定植,株行距 30 cm×50 cm,定植密度约 9.15×10⁴株/hm²。甜玉米种植期间不施肥不灌溉,仅接收自然降水,人工除草。

甜玉米定植前,在每个小区用土钻以 30 cm 为间隔取土样到 180 cm 深,定植后每 10 d 取一次土样,取样方法同前。带回实验室用 0.1 mol/L CaCl₂ 浸提后用流动分析仪(TRRACS2000 型)测定硝态氮含量,同时用干燥法测定土壤含水率。玉米收获时每小区随机取 3 株植株,测定干物质质量和植株含氮量。

1.3 土壤水热碳氮模型

采用本课题组研发的农田生态系统水热碳氮过程耦合模型(WHCNS),该模型可以用来模拟土壤水分运动及碳氮循环的关键过程,包括地表径流、土面蒸发、作物蒸腾、水分动态、土壤温度、氮素迁移与转化、作物生长过程以及农田管理措施等,在这里只对模型原理进行简要介绍,详细过程参照文献[22]。

WHCNS 模型以天为步长,由气象数据和作物生物学参数驱动。在模型中,采用 Penman-Monteith 公式估算参考作物蒸散量。土壤水分入渗和再分布过程分别采用 Green-Ampt 模型和 Richards 方程进行模拟。根系吸水采用 van

Genuchten 模型,并引入了补偿性吸水机制。土壤热运动采用对流-传导方程描述。土壤无机氮的运移采用对流-扩散方程,源汇项中考虑了碳氮循环过程(有机质矿化、生物固持、尿素水解、氨挥发、硝化和反硝化等)和作物吸收,土壤有机质周转动态直接来源于 Daisy 模型^[23]。作物生长发育进程、干物质生产和分配及作物产量的模拟采用荷兰的 PS123 作物模型^[24],通过水氮胁迫校准因子实现水氮限制下作物产量的模拟。

1.4 模型参数

1.4.1 土壤水力学和溶质运移参数

水分特征曲线 $\theta(h)$ 和非饱和导水率 $k(h)$ 分别使用 van Genuchten 和 Mualem 模型描述,模型的参数如表 1 所示。水动力弥散系数可表示为

$$D_{sh}(v,\theta)=D_L\frac{|q|}{\theta}+D_0\tau \tag{1}$$

其中

$$\tau=\theta^{7/3}/\theta_s^2$$

式中 D_0 ——溶质在自由水中的扩散系数,cm²/d,铵态氮和硝态氮分别取 1.2 cm²/d 和 2.4 cm²/d

$|q|$ ——达西流速的绝对值,cm/d

D_L ——纵向弥散系数,取 3.0 cm

τ ——弯曲度因子

v ——流速,cm/d

θ ——土壤含水率,cm³/cm³

1.4.2 土壤碳氮转化参数

模型设定微生物活动范围在 0~30 cm 土层,在此范围内才考虑土壤氮素转化过程。氮素各转化参数参考 Daisy 模型默认值,并根据实际情况进行调整,最大硝化速率 V_n^* 设置为 10 g/(m³·d),硝化半饱和常数 K_n 设置为 50 g/m³, K_d 为经验常数代表土体可反硝化的硝态氮占总硝态氮的比值,设为 0.8,反硝化经验常数 α_d^* 设置为 0.02,氨挥发一阶动力学常数设置为 0.15 d⁻¹。本研究有机质库的分解速率、秸秆的碳氮比和各个有机质库分配系数参数主要来源于前人的研究^[23,25]。

1.4.3 作物参数

作物参数(比叶重、消光系数、作物系数、分配系数)参照文献[24],通过“试错法”调整最大光合量和各器官分配系数,使模拟的叶面积指数和产量与实测值相吻合,调整后的作物参数见表2。

表 2 模型所用的甜玉米作物参数

Tab.2 Crop parameters used in WHCNS model
of sweet corn

参数	数值
作物生长发育最低温度 $T_{base}/^{\circ}\text{C}$	8
出苗到作物成熟所需积温 $T_{sum}/^{\circ}\text{C}$	1 100
消光系数 k_e	0.6
初始作物系数 K_{ini}	0.35
中期作物系数 K_{mid}	1.3
后期作物系数 K_{end}	0.6
最大比叶面积 $SLA_{max}/(\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	30
最小比叶面积 $SLA_{min}/(\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	15
最大同化速率 $AMAX/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	45
根系最大深度 R_{max}/cm	120

1.5 模拟效果评价

选择2种统计参数和相关系数来评价模型的模拟值与实测值的吻合程度,均方根误差(RMSE)和标准化均方根误差(NRMSE),可表示为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \tag{2}$$
$$N_{RMSE} = R_{MSE}/O \times 100\% \tag{3}$$

式中 n ——样本个数

S_i 、 O_i ——模拟值和实测值

O ——实测值的平均值

当RMSE值趋近于0时,模拟值更接近于实测值,模型模拟的效果越好。当NRMSE值小于15%,表示两结果之间的一致性很好;15%~30%之间为较好,若大于30%则两结果之间偏差较大^[26]。

2 结果与分析

2.1 参数敏感度分析

在模型应用之前需要对输入参数进行校准,对于参数较多的动力学模型校准过程十分复杂,而参数敏感度分析结果为模型率定提供了一定的指导作用。前期研究使用PEST参数自动优化工具对土壤-作物系统水热碳氮模型(WHCNS)的土壤水力学参数、氮素转化参数和作物遗传参数共18个参数进行了自动寻优和灵敏度分析^[27]。结果表明,作物参数的敏感度普遍较高(其中作物生长发育总积温和最大比叶面积具有较高的敏感度),其次是土壤水力学参数(它们的敏感度由大到小依次为: θ_s 、 n 、 α 、 θ_r 、

K_s),而氮素转化参数敏感度普遍较低,其中与硝化作用有关的参数较敏感,最大硝化速率常数 V_n^* 敏感度最高,其次是硝化半饱和常数 K_n ,在参数率定时应优先考虑敏感度较高的参数。

2.2 模型校准与验证

利用2008年实测的土壤含水率、硝态氮含量和作物吸氮量数据,采用“试错法”对模型的输入参数进行校准。在校准过程中土壤水力学参数采用表1中的田间实测值。图1和图2分别为2008年5个处理实测的土壤各层含水率和硝态氮含量与模拟值的对比图。从图1可以看出,除了少数点外,绝大部分时期土壤含水率模拟值与实测值均吻合较好,而且土壤含水率出现峰值的时间与降水量有比较好的一致性。从图2可以看出,土壤硝态氮含量在0~60 cm土层变化幅度比较大,而60~180 cm土层变化比较平缓,这与土壤中有机的矿化以及微生物主要在表层0~30 cm活动有关,其NRMSE范围为16.5%~27.2%(表3),说明模拟值与实测值一致性比较好。模拟得到的2008年N1C和N2C处理的作物吸氮量分别为168.3 kg/hm²和168.6 kg/hm²,与实测值吻合也较好(实测值分别为153.6 kg/hm²和169.6 kg/hm²)。

模型校准好后,固定土壤和作物参数,采用2009年和2010年的田间观测数据对模型进行校验,土壤各层含水率的验证结果如图3所示(限于篇幅,仅给出2010的校验结果)。由表3可知,土壤各层含水率的RMSE范围为0.019~0.032 cm³/cm³,NRMSE均小于12%,说明模拟值与实测之间的一致性很好^[26]。图4是2010年土壤剖面硝态氮含量模拟值与实测值的对比,其RMSE范围为7.0~11.8 mg/kg,NRMSE范围为17.0%~27.2%,说明模拟值与实测值一致性也比较好。图5是2008—2010年作物吸氮量模拟值与实测值的对比结果,其统计指数RMSE为13.7 kg/hm²,NRMSE为8.03%,说明模型对作物吸氮的模拟精度较高。综上分析,

表 3 2008—2010 年 5 个处理土壤剖面含水率和硝态氮含量的模拟效果评价指数

Tab.3 Evaluation indices of simulated soil water content and nitrate concentration for all treatments from 2008 to 2010

深度/ cm	土壤含水率		硝态氮含量	
	RMSE/ (cm ³ ·cm ⁻³)	NRMSE/%	RMSE/(mg·kg ⁻¹)	NRMSE/%
0~30	0.031	11.5	10.3	23.5
30~60	0.032	11.6	7.8	16.5
60~90	0.025	8.9	7.5	18.0
90~120	0.029	9.8	7.0	17.0
120~150	0.020	6.5	11.8	27.2
150~180	0.019	6.0	7.5	20.6

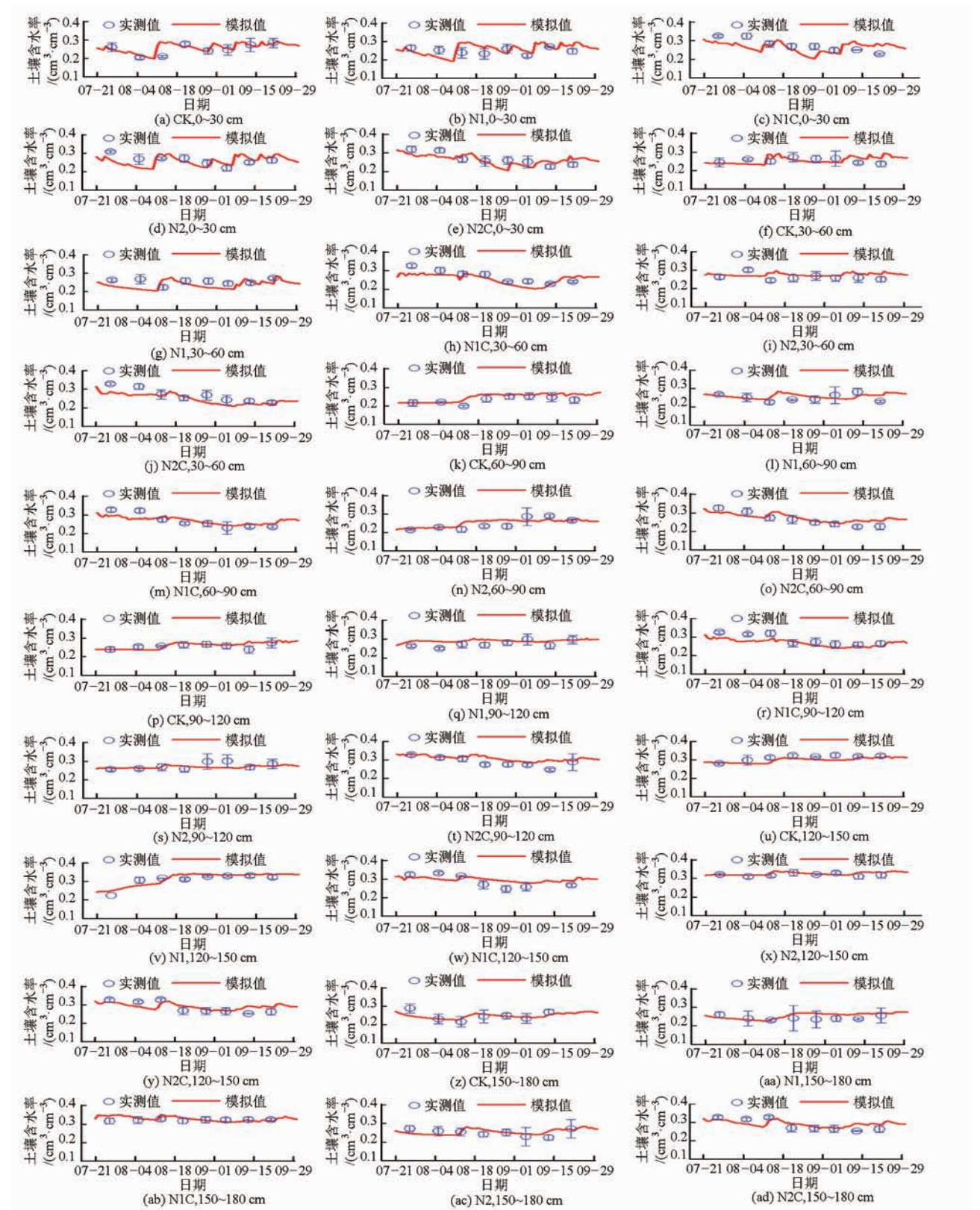


图 1 2008 年 5 个处理不同深度土壤体积含水率的模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparisons of simulated and measured soil water contents at different depths for five treatments in 2008

WHCNS 模型对 2008—2010 年不同处理下土壤水氮动态和作物吸氮量有较高的模拟精度,可以用来模拟和分析不同处理下的水氮平衡。

2.3 设施菜地填闲期土壤水分平衡和水分渗漏

表 4 为模型模拟得到的 2008—2010 年各处理

的水分收支平衡项,由于作物生育期间没有灌溉,降水是唯一的水分来源,而水分的消耗主要是蒸散和渗漏,占到降水总量的 85% 以上。CK、N1 和 N2 处理由于没有种植作物,土面蒸发量即为实际的蒸散量,这 3 个处理的蒸散量在 110 mm 左右,差异不大;

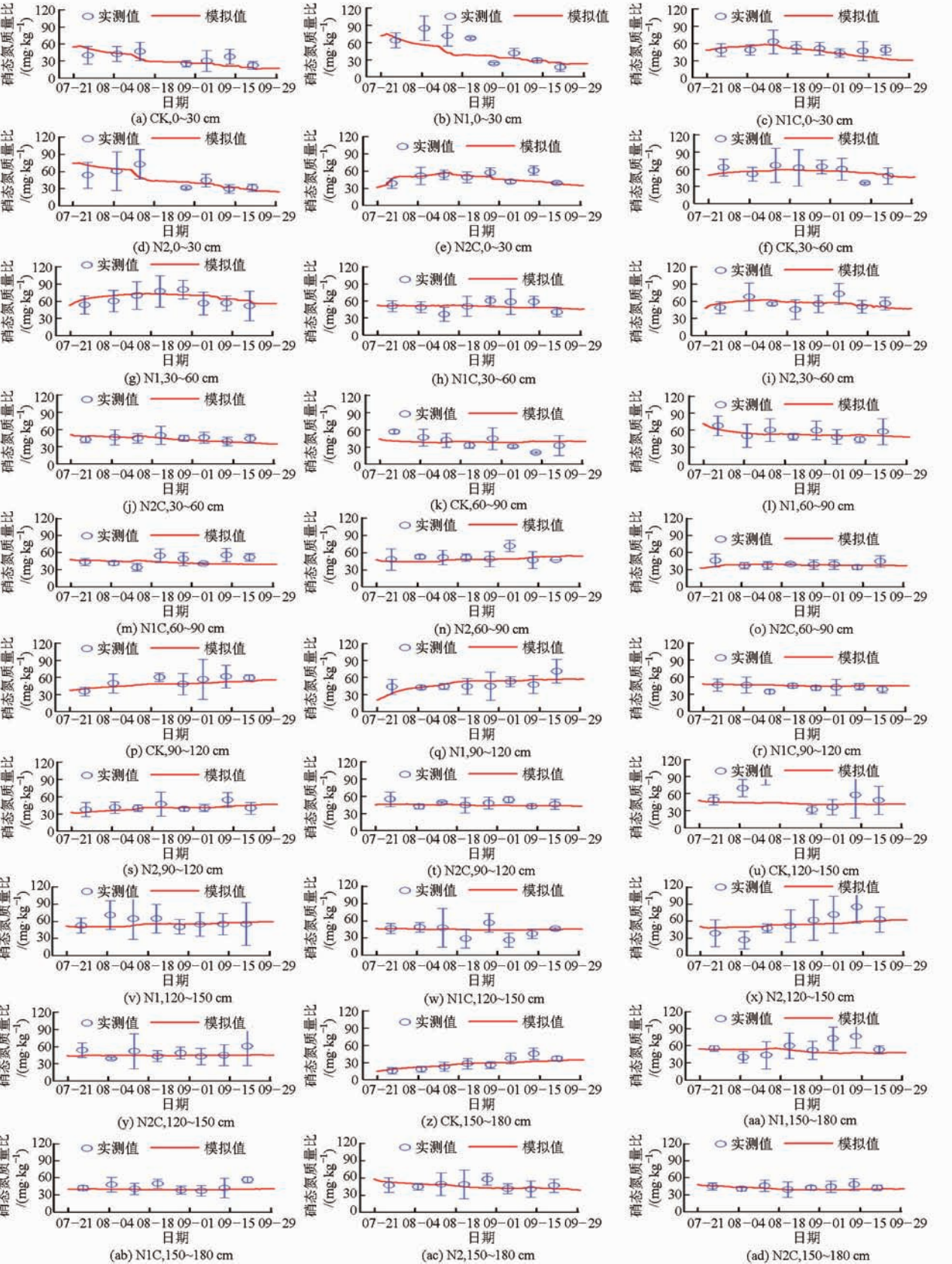


图2 2008年5个处理不同深度土壤硝态氮含量的模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparisons of simulated and measured soil nitrate concentrations at different depths for five treatments in 2008

而 N1C 和 N2C 处理由于种植了甜玉米,蒸散由土面蒸发和作物蒸腾组成,其年际间变化范围分别为 67 ~ 106 mm 和 112 ~ 115 mm,由于甜玉米的种植增加了土壤水分向上的通量。在水分渗漏方面,2008 年和 2010 年休闲期,2 个种植甜玉米处理的水分渗漏量比 3 个休闲处理平均低约 42 ~ 50 mm,而 2009 年

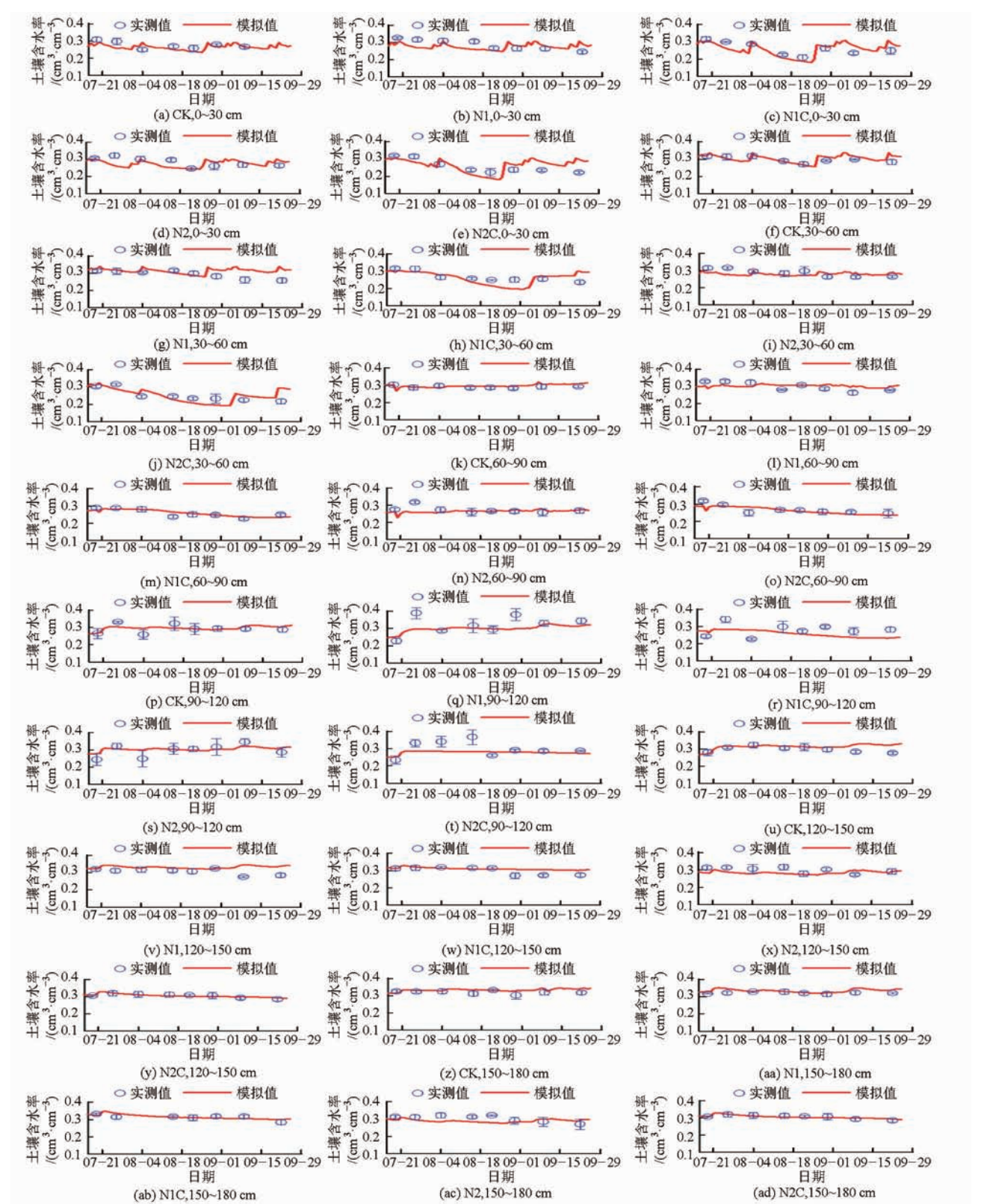


图 3 2010 年 5 个处理不同深度土壤体积含水率的模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparisons of simulated and measured soil water contents at different depths for five treatments in 2010

差别较小,仅 23 mm,其主要原因是 2009 年在玉米定植后的第 3 天发生了 68 mm 的暴雨,导致所有处理的水分渗漏量均很大。另外,2009 年的径流也是 3 a 中最大的。5 个处理 3 a 的平均渗漏量由大到小依次为:CK、N1、N2、N1C、N2C,3 个休闲处理(CK、N1 和 N2)的水分渗漏量明显高于种植甜玉米的处理(N1C 和 N2C),休闲和种植甜玉米处理的水分渗漏量平均分别为 96.9 mm 和 56.6 mm。另外,甜玉米的种植也影响了土壤的水分平衡。从表 4 可以看出,休闲期 CK、N1 和 N2 处理的水分平衡均值为正,

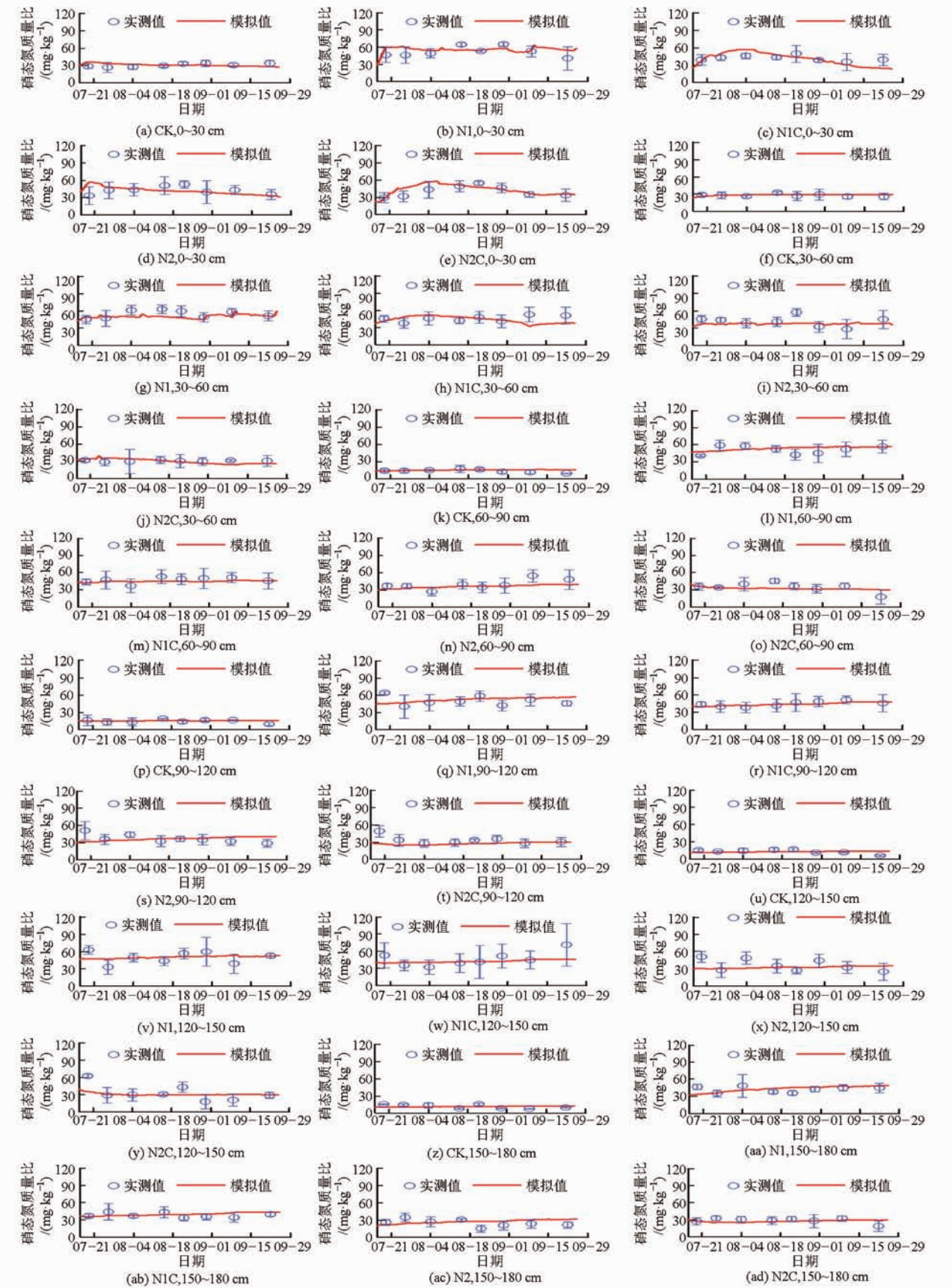


图 4 2010 年 5 个处理不同深度土壤硝态氮含量的模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparisons of simulated and measured soil nitrate concentrations at different depths for five treatments in 2010

而 N1C 和 N2C 处理水分平衡为负,说明甜玉米的种植消耗土体储存的水分,而休闲地土体水分表现为盈余。因此,甜玉米的种植增加了夏季休闲期土壤-作物系统的蒸散量,从而有效地控制了夏季集中降

表 4 模型模拟的 3 a 5 个处理 0 ~ 180 cm 土壤水平衡各项

Tab.4 Water balance in 0 ~ 180 cm depth of soil profile for five treatments from 2008 to 2010								mm
年份	处理	降水量	蒸发量	蒸腾量	蒸散量	渗漏量	径流量	平衡水量
2008 年	CK	259.2	107.2	0	107.2	107.3	5.3	39.4
	N1		105.3	0	105.3	111.5	5.4	37.0
	N2		109.6	0	109.6	122.3	5.4	21.9
	N1C		80.8	122.0	202.7	87.1	5.3	-35.9
	N2C		78.4	116.6	195.1	46.1	5.3	12.7
2009 年	CK	234.1	111.6	0	111.6	108.3	30.1	-15.9
	N1		111.6	0	111.6	108.3	31.3	-17.1
	N2		111.3	0	111.3	107.8	22.1	-7.1
	N1C		67.3	125.3	192.6	97.8	9.8	-66.1
	N2C		67.2	125.4	192.7	72.3	9.7	-40.6
2010 年	CK	227.6	117.5	0	117.5	86.3	4.9	18.9
	N1		117.6	0	117.6	64.5	4.9	40.6
	N2		117.6	0	117.6	55.7	4.8	49.5
	N1C		105.9	115.5	221.4	30.8	4.7	-29.3
	N2C		103.5	114.6	218.1	5.3	4.7	-0.5
3a 平均	CK	240.3	112.1	0	112.1	100.6	13.4	14.2
	N1		111.5	0	111.5	94.8	13.9	20.1
	N2		112.8	0	112.8	95.3	10.8	21.4
	N1C		84.7	120.9	205.6	71.9	6.6	-43.8
	N2C		83.0	118.9	202.0	41.2	6.6	-9.5

注：平衡水量等于降水量减去蒸散量、渗漏量和径流量。

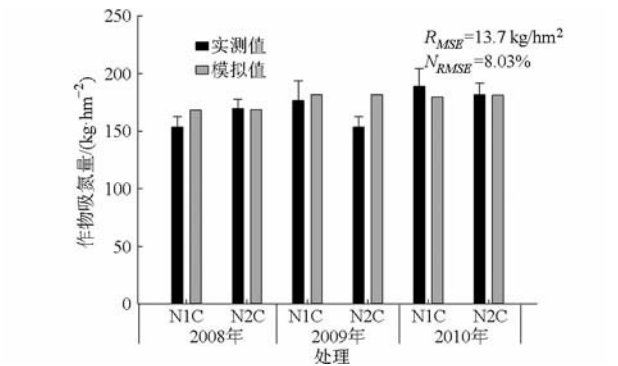


图 5 2008—2010 年 N1C 和 N2C 处理作物吸氮量的模拟值与实测值的比较

Fig.5 Comparison of simulated and measured crop N uptakes for all treatments from 2008 to 2010

水导致的水分大量渗漏问题。

2.4 设施菜地填闲期土壤氮素平衡及氮素淋失

表 5 为模型模拟的 2008—2010 年 5 个处理的氮素平衡项,甜玉米生长季未施用化肥,氮素主要来源于土体残留和有机氮的矿化。3 个休闲处理(CK、N1 和 N2)氮素主要支出项分别为氮素淋失和氮挥发,其氮素淋失占总氮支出的比例达到 85% ~ 91%。N1C 和 N2C 处理的主要氮素支出为作物吸收,占总氮支出的 80% ~ 85%,而氮素淋失仅占总氮支出的 11% ~ 17%。相比休闲处理,N1C 和 N2C 处理的氮挥发较低,不到氮素总支出的 5%,这可能

表 5 模型模拟的 3 a 5 个处理 0 ~ 180 cm 土壤氮平衡各项
Tab.5 Nitrogen balance in 0 ~ 180 cm depth of soil profile for five treatments from 2008 to 2010

		kg/hm ²					
年份	处理	矿化量	作物吸氮量	淋失量	反硝化量	氮挥发量	氮平衡量
2008 年	CK	70.7	0	151.6	4.2	12.6	-97.7
	N1	70.6	0	273.6	4.2	13.7	-220.9
	N2	71.0	0	241.4	4.5	13.4	-188.3
	N1C	71.7	168.3	46.3	3.9	4.7	-151.5
	N2C	71.7	168.6	25.1	4.9	4.5	-131.4
2009 年	CK	71.2	0	101.2	4.7	15.2	-49.9
	N1	71.2	0	184.3	4.7	15.3	-133.1
	N2	71.2	0	154.8	4.6	15.3	-103.5
	N1C	71.7	181.7	50.9	3.3	4.0	-168.2
	N2C	71.6	181.9	40.7	3.4	4.0	-158.4
2010 年	CK	69.9	0	38.6	4.9	11.0	15.4
	N1	70.0	0	96.5	5.2	10.9	-42.6
	N2	69.9	0	59.2	5.0	10.9	-5.2
	N1C	71.0	184.4	13.9	3.3	4.5	-135.1
	N2C	71.7	182.8	1.3	4.2	4.4	-121.0
3 a 平均	CK	70.6	0	97.1	4.6	12.9	-44.1
	N1	70.6	0	184.8	4.7	13.3	-132.2
	N2	70.7	0	151.8	4.7	13.2	-99.0
	N1C	71.5	178.1	37.0	3.5	4.4	-151.6
	N2C	71.7	177.8	22.4	4.2	4.3	-136.9

注：土壤氮平衡量等于矿化量减去作物吸氮量、淋失量、反硝化量和氮挥发量。

是甜玉米吸收了土壤表层的无机氮,降低了地表铵态氮的浓度;5个处理的反硝化量均较低(小于 5 kg/hm^2),这可能与休闲期不施化肥有关。

3 a 硝态氮的淋失量由大到小依次为:N1、N2、CK、N1C、N2C,前茬蔬菜的氮素管理模式影响了休闲期土壤的氮素平衡,前茬施氮量高的处理N1和N1C的氮素淋失分别高于N2和N2C处理;种植填闲作物的处理N1C(37 kg/hm^2)和N2C(22.4 kg/hm^2)的氮素淋失量均远低于CK(97.1 kg/hm^2)处理。处理N1和N2 3 a 平均氮素淋失量分别是处理N1C和N2C的5.0倍和6.8倍,说明填闲作物的种植对硝态氮的淋失有非常明显的阻控作用,大大减少了硝酸盐的淋失。在氮素平衡方面,5个处理的土体氮素均表现为亏缺状态,其中,N1C和N2C亏缺最为严重,3 a 平均值分别达到 151.6 kg/hm^2 和 136.9 kg/hm^2 ,这可能与夏季较为集中的降水和作物的吸收有关。

分年份来看,CK处理的氮素淋失量呈逐年显著下降的趋势,这主要与该处理不施肥,前茬蔬菜收获后土体硝态氮累积量逐年大幅减少有关。N1和N2处理的氮素淋失量也呈逐年显著下降的趋势,这与土体氮素亏缺程度逐年下降导致蔬菜收获后土体硝态氮累积量呈逐年递减有关。前2 a N1C和N2C处理的氮素淋失量均分别高于2010年,这与2010年休闲期的降水量较低有关。

3 讨论

我国北方设施蔬菜生产中,由于夏季(6—9月份)气温较高,大部分温室处于敞棚休闲状态,而降水主要集中在这一时期,加上前茬蔬菜大量施用氮肥,土体累积了过量的无机氮,很容易造成土壤水分渗漏和硝酸盐的淋失^[8-10]。一些研究表明种植填闲作物可以有效地减少土壤水分渗漏和硝酸盐淋失。PLAZA-BONILLA等^[16]使用STICS模型模拟了不同豆科填闲作物对水分渗漏的影响,发现豆科作物可以显著减少水分渗漏,从年均737 mm减少到544 mm。本研究中休闲处理的水分消耗项主要是蒸发和渗漏,而填闲作物处理的水分消耗主要是蒸腾和渗漏,甜玉米的种植提高了土壤水分的上行通量,减少了近42%的水分渗漏,其原因在于夏季作物生长比较旺盛,在某些时段蒸散量可能会大大超过降水量,即使有短时强降雨,土壤水分虽向下运动,但在短时间内即可达到平稳,随即又迅速向上运动,减少了水分渗漏量,而且这种趋势在种植深根系作物的情况下更为明显^[16-17]。THOMSEN^[18]在丹麦的研究结果显示,种植非豆科填闲作物可以降低13.4%的水分

渗漏。另外,填闲作物的种植也影响土壤的水分平衡,本研究发现甜玉米的种植消耗了土壤水分,使其处在亏缺状态,而休闲处理的土壤水分表现为盈余,与上述学者的研究结果类似^[11,16]。陆扣萍等^[11]在太湖地区的研究发现休闲期种植甜玉米没能显著减少土壤水分渗漏量,但能有效减少渗漏液中硝酸盐浓度,这可能与当地休闲期内暴雨较多,甜玉米的蒸腾占水分总输入的比例较小有关。

大量研究表明,与休闲地相比,通过种植深根系填闲作物可以吸收土壤中残留的氮,并利用蒸腾作用对土体中水分和氮素进行抽提,消减填闲作物根层甚至根层下部氮素积累量,是限制土壤氮素向下迁移和淋失的一个重要措施^[16,20]。任智慧等^[12]以甜玉米、苋菜作为填闲作物,研究了土壤硝态氮累积的变化,发现甜玉米和苋菜吸氮量可达到 $184\sim 256\text{ kg/hm}^2$,种植填闲作物后土壤0~90 cm土层中硝态氮含量降低到 100 kg/hm^2 以下。吴雪玲等^[13]比较了优化施肥、添加秸秆和种植填闲作物3种措施对土壤硝态氮累积与淋失的影响,发现阻控硝态氮淋失的效果优劣顺序依次为:种植填闲作物、优化施肥、添加秸秆。郝晓然等^[14]研究发现在硝态氮高累积的设施土壤上,种植填闲作物结合土壤调理剂和秸秆还田措施能够显著提高甜玉米对0~2 m土体硝态氮的消减能力,减缓土壤硝态氮的淋失。姜春光等^[15]对北方设施菜地氮素淋失的监测结果表明,种植糯玉米作为填闲作物能有效阻控氮素淋失,与休闲处理相比,氮素淋失量减少了11%。PLAZA-BONILLA等^[16]使用STICS模型模拟发现休闲期种植豆科作物硝酸盐淋失量可以减少66%;THOMSEN^[18]在丹麦对非豆科填闲作物的研究发现,非豆科作物可以显著减小48%~76%硝酸盐淋失;TONITTO等^[19]通过元分析方法发现,豆科和非豆科填闲作物都能很好地减少硝酸盐淋失,分别平均降低土壤70%和40%的硝酸盐淋失量。本研究中硝态氮的淋失量由大到小依次为:N1、N2、CK、N1C、N2C,填闲处理的氮素淋失量为 $1.3\sim 50.9\text{ kg/hm}^2$ (平均为 29.7 kg/hm^2)远低于施肥处理的 $59.2\sim 273.6\text{ kg/hm}^2$ (平均为 168.3 kg/hm^2),甚至低于不施肥处理的 $38.6\sim 151.6\text{ kg/hm}^2$ (平均为 97.1 kg/hm^2),N1C和N2C处理的氮素淋失量分别比N1和N2处理降低80%和85%。说明填闲作物的种植对硝态氮的淋失有明显的阻控作用,大大减少了硝酸盐的淋失。

由于氮素损失量受灌水量、施氮量、土壤质地、根层土壤氮素含量及其在土壤剖面内的分布特征等因素的影响^[5,8-10],这些因素也是影响填闲作物吸

氮和阻控硝酸盐淋失能力的因素。另外,填闲作物吸氮和阻控硝酸盐淋失的能力还与作物生长量、根系生长速率、作物根系分布等自身因素有关。一些研究发现氮素淋失与降水强度密切相关,降水量大的年份土壤氮素淋失量都显著高于降水量小的年份^[28]。因此,这些单个因素或组合因素对甜玉米的提氮作用和氮淋失阻控效果的影响还有待进一步深入研究。

本研究中由于没有对土壤氮素转化的各个过程进行观测(如矿化、氨挥发等),在模型校准过程中一些氮素转化参数采用了文献中的参考值,这给模型的输出带来了一些不确定性,如图 2 中某些土层(CK 处理的 120~150 cm 土层、N1 处理的 0~30 cm 土层等)硝态氮的模拟值与实测值存在较大差异,这可能与 CK 与 N1 小区存在空间变异或大孔隙优先流等有关。5 个处理中绝大多数土层的模拟效果是可以接受的。另外,前期研究中 WHCNS 模型参数的敏感度分析也表明^[27],氮素转化参数的敏感度相对土壤水力学参数和作物参数普遍较低,而土壤水力学参数采用了田间实测值,因此,本研究氮素转化参数采用参考值给模拟带来的误差是可以接受的。

4 结论

(1)WHCNS 模型校验结果表明,对土壤剖面含水率和作物吸氮量模拟的评价指数 NRMSE 均小于 15%,土壤硝态氮的 NRMSE 小于 30%,说明模型对 2008—2010 年不同处理下土壤水氮动态和作物吸氮有较高的模拟精度,可以用来模拟和分析不同处理之间的水氮平衡。

(2)水分平衡分析结果表明,夏季填闲甜玉米的种植增加了土壤—作物系统的蒸散量,同时有效地减少了夏季集中降雨导致的水分渗漏,休闲和种植甜玉米处理水分渗漏的 3 a 平均值分别为 96.9 mm 和 56.6 mm。休闲处理的水份平衡均值为正,而填闲处理的水份平衡为负,说明甜玉米的种植消耗了土体储存的水分。

(3)硝态氮的淋失量由大到小依次为:N1、N2、CK、N1C、N2C,前茬施氮量高的处理(N1 和 N1C)氮素淋失分别高于施氮量低的治疗(N2 和 N2C);种植填闲作物的处理(N1C 和 N2C)氮素淋失量分别比休闲处理(N1 和 N2)降低 80% 和 85%,说明填闲作物的种植对硝态氮的淋失有明显的阻控作用,大大减少了硝酸盐的淋失,同时减少了氨挥发损失。

参 考 文 献

- 1 中国农业部. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- 2 JU X T, GAO Q, CHRISTIE P, et al. Interception of residual nitrate from a calcareous alluvial soil profile on the North China Plain by deep-rooted crops: a 15N tracer study[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 146(2): 534–542.
- 3 MIN J, ZHAO X, SHI W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464–472.
- 4 SUN Y, HU K L, FAN Z B, et al. Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU-Rotate_N model[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128: 72–84.
- 5 吴永成,周顺利,王志敏,等. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1620–1625.
WU Yongcheng, ZHOU Shunli, WANG Zhimin, et al. Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1620–1625. (in Chinese)
- 6 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
ZHU Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783. (in Chinese)
- 7 PANG Z H, YUAN L J, HUANG T M, et al. Impacts of human activities on the occurrence of groundwater nitrate in an alluvial plain: a multiple isotopic tracers approach[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24(1): 111–124.
- 8 HU K L, HUANG Y F, LI H, et al. Spatial variability of shallow ground-water level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain[J]. *Environment International*, 2005, 31(6): 896–903.
- 9 高海鹰,黄丽江,张奇,等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1346–1352.
GAO Haiying, HUANG Lijiang, ZHANG Qi, et al. Nitrogen leaching under different rainfall intensities for agricultural soil-laboratory experiments and numerical modeling using LEACHM[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1346–1352. (in Chinese)
- 10 LIU X, JU X, ZHANG F, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111–124.
- 11 陆扣萍,闵炬,施卫明,等. 填闲作物甜玉米对太湖地区设施菜地土壤硝态氮残留及淋失的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 331–339.
LU Kouping, MIN Ju, SHI Weiming, et al. Effect of sweet corn as a catch crop on residual and leaching loss of soil nitrogen in

- protected vegetable soil in Taihu lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 331–339. (in Chinese)
- 12 任智慧,李花粉,陈清,等. 甜玉米填闲减缓菜田土壤硝酸盐淋溶的研究[J]. *农业工程学报*,2006,22(9): 245–249.
REN Zhihui, LI Huaifen, CHEN Qing, et al. Soil nitrogen uptake by sweet corn to reduce nitrogen leaching in the vegetable field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9): 245–249. (in Chinese)
- 13 吴雪玲,左强,吴建新,等. 保护地菜田土壤氮素淋溶阻控措施及其效果研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 59–62.
WU Xueling, ZUO Qiang, WU Jianxin, et al. Study on measures for reducing nitrogen leaching facility vegetable field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 59–62. (in Chinese)
- 14 郝晓然,彭亚静,张丽娟,等. 根层调控措施对甜玉米-黄瓜设施蔬菜轮作体系土壤硝态氮的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(12): 2390–2400.
HAO Xiaoran, PENG Yajing, ZHANG Lijuan, et al. Effect of root layer regulations on soil nitrate of the rotation system of sweet corn-cucumber in greenhouse vegetable production system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2390–2400. (in Chinese)
- 15 姜春光,卢树昌,陈清. 模拟不同降雨条件对日光温室填闲作物糯玉米产量、根系生长及养分吸收的影响[J]. *北方园艺*, 2011(17): 71–75.
JIANG Chunguang, LU Shuchang, CHEN Qing. Study on the effect of simulation different rainfall on the yield, root growth and nutrient uptake of catch crop-waxy corn in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2011(17): 71–75. (in Chinese)
- 16 PLAZA-BONILLA D, NOLOT J M, RAFFAILLAC D, et al. Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: field evidence and model simulations[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 212(1): 1–12.
- 17 BLOMBACK K, ECKERSTEN H, LEWAN E, et al. Simulations of soil carbon and nitrogen dynamics during seven years in a catch crop experiment[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76(1): 95–114.
- 18 THOMSEN I K. Nitrate leaching under spring barley is influenced by the presence of a ryegrass catch crop: results from a lysimeter experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 111: 21–29.
- 19 TONITTO C, DAVID M B, DRINKWATER L E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: a meta-analysis of crop yield and N dynamics[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(1): 58–72.
- 20 THORUP-KRISTENSEN K, MAGID J, JENSEN L S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 79(2): 227–302.
- 21 WANG Q, LI Y, KLASSEN W. Influence of summer cover crops on conservation of soil water and nutrients in a subtropical area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(1): 58–63.
- 22 梁浩,胡克林,李保国,等. 土壤-作物-大气系统水热碳氮过程耦合模型构建[J]. *农业工程学报*,2014, 30(24): 54–66.
LIANG Hao, HU Kelin, LI Baoguo, et al. Coupled simulation of soil water-heat-carbon-nitrogen process and crop growth at soil-plant-atmosphere continuum system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(24): 54–66. (in Chinese)
- 23 HANSEN S, JENSEN H E, NIELSEN N E, et al. NPo-research, A10: DAISY: soil plant atmosphere system model[M]. Copenhagen: Miljøstyrelsen, 1990.
- 24 DRIESSEN P M, KONJIN N T. Land use system analysis[M]. Wageningen: WAE & INRES, 1992.
- 25 MUELLER T, JENSEN L S, NIELSEN N E, et al. Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in field[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1998, 30(5): 561–571.
- 26 LI Z T, YANG J Y, DRURY C F, et al. Evaluation of the DSSAT–CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 135: 90–104.
- 27 梁浩,胡克林,李保国. 基于 PEST 的土壤-作物系统模型参数优化及灵敏度分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 78–85.
LIANG Hao, HU Kelin, LI Baoguo. Parameter optimization and sensitivity analysis of soil-crop system model using PEST[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(3): 78–85. (in Chinese)
- 28 李桂花,张艳萍,胡克林. 不同降雨和灌溉模式对作物产量及农田氮素淋失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 545–554.
LI Guihua, ZHANG Yanping, HU Kelin. Modeling the effect of rainfall and irrigation on nitrate leaching and crop yield in wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinia*, 2013, 46(3): 545–554. (in Chinese)