

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.020

稻田水体碳氮稳定同位素组成与时空变化研究*

刘慧¹ 王为木^{1,2} 谈建康³ 王群²

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3. 南京市溧水区环境监测站, 南京 211200)

摘要: 利用稳定同位素技术研究了稻田沟渠、池塘、湿地等水体的碳、氮稳定同位素组成特征与时空变化。结果表明, 水中颗粒性有机物 (Particulate organic matter, POM) $\delta^{13}\text{C}$ 值 (稳定性碳同位素比值) 在 $-31.5\text{‰} \sim -24.3\text{‰}$ 之间变化, 平均值为 -27.7‰ , 可能主要来自于浮游植物和浮游动物的贡献。POM 稳定性碳同位素比值存在明显的季节变化, 呈现出春、夏季高于秋、冬季的趋势。浮游动物与 POM 稳定性碳同位素比值之间的时空变化存在一定的相关性, 说明研究区内浮游动物对内源有机碳的利用可能主要来自 POM。颗粒性有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 存在秋、冬季高于春、夏季的趋势, 但空间差异不显著, 其中湿地的变化幅度相对较大 ($3.2\text{‰} \sim 6.3\text{‰}$), $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 平均值为 4.1‰ , 说明研究区固氮作用较小, 外源物的污染程度较低。

关键词: 稳定同位素 碳 氮 水稻田

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)02-0132-05

Temporal and Spatial Variation in Stable Carbon and Nitrogen Isotope in Paddy Field Water

Liu Hui¹ Wang Weimu^{1,2} Tan Jiankang³ Wang Qun²

(1. Key Laboratory of High-Effective Irrigation and Drainage and Agricultural Water and Soil Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. Environmental Monitoring Station of Lishui District, Environmental Protection Bureau of Nanjing, Nanjing 211200, China)

Abstract: Since the stable isotope composition was widely used as tracers in the process of pollutant migration and transformation, stable isotope analyses of carbon and nitrogen in paddy field sampled from Nanjing irrigation area were studied. The results showed that delta C-13 values of particulate organic matter (POM) were between $-31.5\text{‰} \sim -24.3\text{‰}$, with an average value of -27.7‰ . The stable carbon and nitrogen characters of particulate organic matter (POM) varied greatly in different sites. The isotopic signatures of both POM and zooplankton remained sufficiently distinct from each other throughout the period of study. Delta C-13 values of particulate organic matter and zooplankton showed some seasonal variation, reflecting higher values during spring and summer than autumn and winter. But delta N-15 values were more constant except the last sampling. The spatial and temporal variations of delta C-13 values were similar between zooplankton and POM, which meant that POM may be the main resource of zooplankton. The minimum delta N-15 value of POM was 3.1‰ and nitrogen fixation could be ignored in the study area. This study was the first to quantify such a seasonal switch in zooplankton and particulate organic matter in paddy field.

Key words: Stable isotope Delta C-13 Delta N-15 Paddy field

收稿日期: 2014-02-26 修回日期: 2014-04-23

* 国家自然科学基金资助项目 (51109060)、江苏省环保科研资助项目 (2013057) 和中央高校基本科研业务费资助项目 (2009B09114、2010B02114)

作者简介: 刘慧, 副教授, 主要从事农业水土环境污染及控制研究, E-mail: liuhui@hhu.edu.cn

引言

稳定同位素为分析特定生态系统中的主要污染源以及污染物的循环途径等提供了一种有效的研究手段,对生态系统的管理和修复具有重要的现实意义。稳定同位素的研究与应用还可以扩展到区域乃至全球范围内环境变化的响应^[1]。目前国内外学者主要通过比较不同水域悬浮颗粒、沉积物、水生生物中 $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 值,确定外源物的主要存在位置及其来源^[2-4]。而综合使用稳定碳、氮同位素作为示踪剂,可以更精确地评估污染状况,能够实时监控区域的环境质量。

水域系统中颗粒性有机物(POM)稳定性碳同位素可用来揭示有机物的来源、初级生产力和水体表层的 CO_2 ;稳定性氮同位素能够反映氮的循环过程。稳定碳、氮同位素呈现出时间上的变化,而这种变化与外部负荷、浮游植物种类、初级生产力相关,同时与溶解无机碳、氮的来源以及同位素的组成有密切关系^[5]。水体中POM是联系无机环境物质和生命有机体的关键环节,因此,POM的来源对于研究外源物对整个水域生态系统的影响具有重要意义。

目前稳定性碳、氮同位素技术已经被应用于海洋、湖泊等大型水域系统的结构分析,并取得了理想的结果。然而,稳定同位素技术在农田生态系统的应用较少^[4]。因此,本文以南京市淳东灌区为例,研究南方稻田水域稳定碳、氮同位素的时空变化,探讨其可能的影响因素,可为稻田生态系统的良好运行提供理论依据。

1 研究区概况

淳东灌区是南京市唯一的大型灌区,位于江苏省西南端苏皖交界处,地处 $31^\circ22'04''\sim 31^\circ22'58''\text{N}$ 、 $119^\circ04'25''\sim 119^\circ04'77''\text{E}$ 之间,自然地形属低山丘陵区,地形起伏较大,岗塘交错,耕地主要分布在岗、塘、冲之间,境内地面高程一般在 $15\sim 40\text{ m}$ (黄海零点)。区域内多年平均降水量 $1\ 196.5\text{ mm}$,68%的降水集中在夏季,一般出现在6月下旬至7月中旬。冬季降水稀少,仅占全年降水量的9.1%。

试验研究区位于灌区中部,为典型水稻-油菜水旱轮作田块,其水域由生态沟渠、人工湿地和池塘组成。人工湿地系统面积为 $21\ 210.6\text{ m}^2$ 、水深 1.5 m ;池塘蓄水容积为 $3\ 388.82\text{ m}^3$,蓄水深度为 2.5 m 。沟渠总长 404 m ,上、中、下游每段长 134.6 m 。农田灌溉和降水后的排水,经过田间水位控制柜进入生态沟渠。生态沟渠可对农田排水进行初步净化,人

工湿地起到强化处理的作用。在干旱季节,可通过泵房将人工湿地中的水提至池塘用于灌溉,实现净化水的循环利用。

2 材料和方法

2.1 样品采集

分别于2012年5月、2012年10月、2013年6月和2013年11月在试验研究区内采集样品,采样点选取具有代表性的位点,同时尽量远离人为干扰。采样点包括沟渠上游、沟渠中游、沟渠下游、湿地和池塘(西北方向)。图1为采样点的布置图。

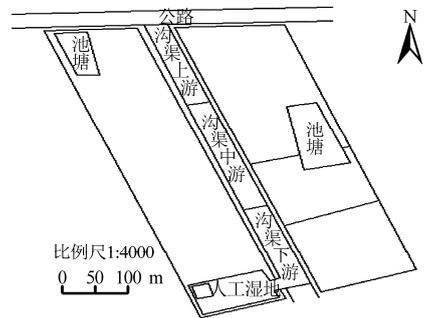


图1 采样点布置

Fig. 1 Location of sampling sites

各采样点水样的部分理化参数如表1所示。所有水样采自水面下 $10\sim 20\text{ cm}$ 处,经 $120\ \mu\text{m}$ 孔径尼龙网预过滤后取水 2 L ,其中 1 L 加入少许饱和 HgCl_2 溶液,用10%稀盐酸调pH值为2,立刻于 -20°C 冰冻保存。浮游动物采用标准的25号浮游生物网($64\ \mu\text{m}$)自水底至水表垂直拖网采样,采集后带回实验室分选。每种样品采集3个平行样。

表1 淳东灌区采样点水体理化参数

Tab. 1 Water characteristics of sampling sites in irrigated area

采样点	温度/ $^\circ\text{C}$	溶解氧质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH值
沟渠上游	21.8	4.53	0.37	7.32
沟渠中游	21.4	2.80	0.40	7.23
沟渠下游	22.7	7.40	0.35	7.31
湿地	22.2	9.87	0.30	8.06
池塘	22.4	7.29	0.27	7.40

2.2 样品的预处理和同位素分析

颗粒性有机物(POM)样品由真空抽滤加入饱和 HgCl_2 溶液和稀盐酸的水样获得,所用滤膜为经预灼烧(450°C 、 4 h)的Whatman GF/F玻璃纤维滤膜,以去除有机杂质的影响。

浮游动物用蒸馏水清养 2 h 以排空其消化道内含物,利用动物的趋光性光诱人工挑选活体,冷冻保存。以上样品均经恒温干燥箱 60°C 干燥 48 h 至恒

质量,并充分研磨备用。

碳、氮稳定同位素分别以国际标准(VPDB)和大气氮为参考标准,所有样品经Flash EA1112型元素分析仪燃烧,产生的CO₂和N₂气体分别由美国Thermo Fisher Scientific公司生产的MAT253型气体同位素质谱仪测定。使用SPSS 13.0软件进行数据处理,采用One-way ANOVA进行方差分析。

3 结果与分析

3.1 试验期间降水量

试验区位于亚热带和暖温带的过渡地带,降水量具有明显的季节变化。采样时间选取春夏季和秋冬季,通过采集两年数据进行对比分析,采样期各月份降水量分别为126.6、189.8、62.8和55.7 mm。

3.2 颗粒性有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化

从图2可以看出,不同采样点颗粒性有机物稳定碳同位素比值差异较大, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 在 -31.5‰ ~ -24.3‰ 之间变化,平均值为 -27.7‰ 。最高值出现在2013年6月沟渠上游,最低值出现在2013年11月沟渠下游。经过单因素方差分析,湿地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 显著高于池塘,从沟渠上游到下游 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 基本呈现递减的趋势。整体上看,表现出春、夏季高,秋、冬季低的波动。

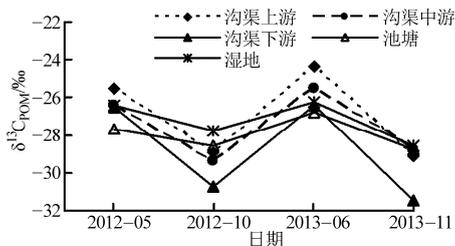


图2 颗粒性有机物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 的变化

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ variation of POM

3.3 浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化

从图3可看出,浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -34.7‰ ~ -27.1‰ 之间变化,平均值为 -30.2‰ 。其中沟渠中游 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度较大,最高值出现在2013年6月,最低值出现在同年11月。单因素方差分析表明,5个位点浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在显著差异。除湿地外,其他4个位点都呈现春、夏季高于秋、冬季的趋势,最大值和最小值分别出现在2013年6月(-28.1‰)和2013年11月(-33.3‰),这可能与该年度降水较多有一定关系。

3.4 颗粒性有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化

颗粒性有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 在 3.1‰ ~ 6.3‰ 之间变化(图4),平均值为 4.1‰ 。各点最高值均出现在2013年11月,其中湿地 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 值在不同时间变化最大。沟渠上游和中游变化趋势较为一致,2013年

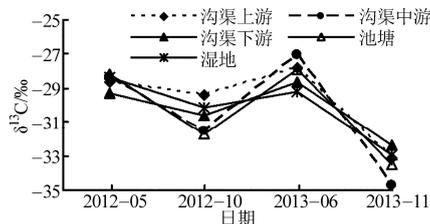


图3 浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}$ variation of zooplankton

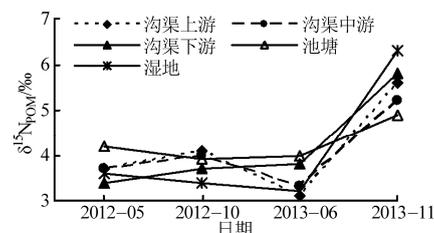


图4 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 的变化

Fig. 4 Variation of $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$

6月达到最低。总体而言,春、夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显低于秋冬季,这可能是由于大量降水将POM中氮素通过溶解、径流等方式进行迁移。经过单因素方差分析,随时间变化各点之间 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 存在显著差异。

3.5 浮游动物和POM碳同位素时空变化

从图5看出,各点之间浮游动物与POM碳同位素值大部分没有重叠,且浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于颗粒性有机物,因此根据消费者和其食物的碳稳定同位素一致性原理,相对而言,浮游动物所摄食的POM较为贫化。这可能是由于浮游动物本身脂类的聚集,受到试验条件的限制浮游动物没有进行去脂处理,一般认为脂类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低。不同季节浮游动物与POM的差值有一定的变化,可能是由于浮游动物的食性发生了改变。

4 讨论

水体中POM由外源有机物和内源有机物组成,外源有机物主要是陆地植物及土壤有机质;内源有机物包括浮游生物、大型水生植物、底栖藻类和细菌等^[6]。通常外源物在湖泊和河流的河口贡献较大,随着向敞开水区的推进,内源物的贡献逐渐增加。本研究区域稻田-沟渠-湿地系统水循环受人为施肥等影响,外源物的输入对稻田水系统的影响较明显^[4]。在整个稻田系统中,研究区域周边植被较少,陆地植物碎屑有机物的影响范围较小。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 通常随着水体初级生产力的变化而变化,Gu等^[7-8]通过研究发现温带和亚寒带的富营养化湖泊 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 存在典型的季节变化。本研究发现类似结果, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 表现出明显的季节变化。浮游动物与POM碳同位素值大部分没有重叠,且浮游动物

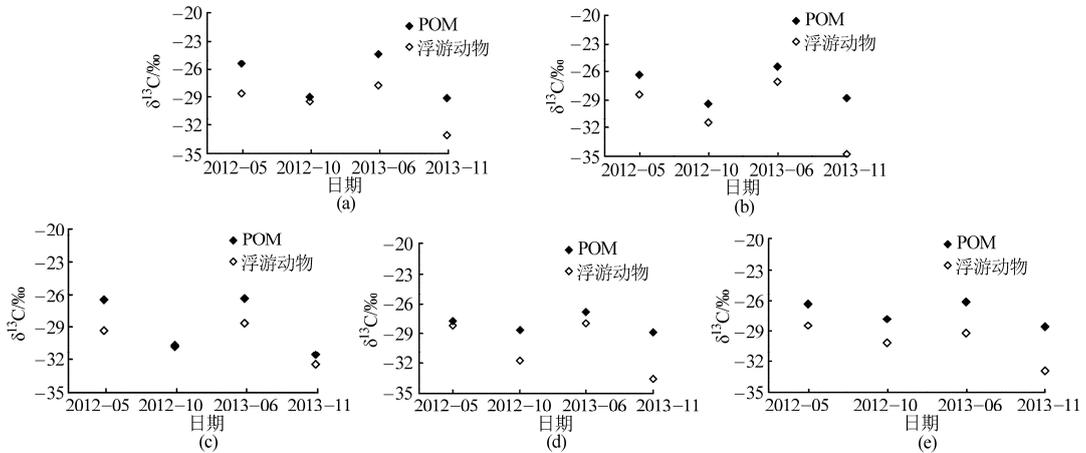


图 5 浮游动物与 POM 碳同位素时空变化

Fig. 5 Differences of $\delta^{13}\text{C}$ between zooplankton and POM

(a) 沟渠上游 (b) 沟渠中游 (c) 沟渠下游 (d) 池塘 (e) 湿地

$\delta^{13}\text{C}$ 值较 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 低; 有人认为浮游动物与 POM 之间 $\delta^{13}\text{C}$ 差值较大, 可能是含有较高 ^{13}C 的陆源有机物对 POM 的稀释^[9]。

$\delta^{15}\text{N}$ 体现的是物源信息和生物地球化学过程的综合, 可指示食物链或食物网的污染程度^[10]。试验区水域颗粒性有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 空间变化不显著, 说明区域外源物的污染程度较低。富营养化湖泊中浮游植物在 POM 中占得比重大, 浮游植物容易受外界环境变化的影响, 贫营养湖泊中外源物是其主要组成成分, 而且外源 $\delta^{15}\text{N}$ 一般较稳定, 因此富营养化水域的 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 高于贫营养化水域^[11]。影响 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 的主要因素是 N_2 的固定, 固氮作用的过程中使同位素的分馏较小, $\delta^{15}\text{N}$ 接近于零。富营养化的湖泊浮游藻类通常 $\delta^{15}\text{N}$ 很低^[12-15]。本研究中 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 最低值为 3.1‰, 相对比而言数值较高, 说明区域固氮作用较小。

由于颗粒有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 组成结构较为复杂, 受影响的因素较多, 包括浮游植物的种类、溶解性有机

氮、水体中的初级生产力和外源污染物的影响, 因此对 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 时空变化还需做更深入的研究。其次, 污染对地下水的影响受到广泛关注^[16], 后续研究将进一步加强地下水的稳定同位素示踪。

5 结论

(1) 颗粒性有机物稳定碳同位素比值存在明显的季节变化: 呈现出春、夏季高, 秋、冬季低的波动。影响 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 主要因素可能是初级生产力, 试验区内春、夏季初级生产力较高, 秋、冬季较低。

(2) 颗粒性有机物与浮游动物稳定碳同位素比值存在一定的相关性, 说明研究区浮游动物对内源有机碳的利用可能主要来自于颗粒性有机物。

(3) $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 最低值为 3.1‰, 说明该区域固氮作用较小。由于颗粒有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 组成结构较为复杂, 影响因素较多, 因此对 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 时空变化还需做更深入的研究。

参 考 文 献

- Craine J M, Elmor A J, Aida M P M, et al. Global patterns of foliar nitrogen isotope and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations and nitrogen availability[J]. *New Phytologist*, 2009, 183(4): 980-992.
- 魏秀国, 卓慕宁, 郭治兴, 等. 西江水体悬浮物颗粒有机碳稳定同位素组成及时空变化[J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 2127-2131.
Wei Xiuguo, Zhuo Muning, Guo Zhixing, et al. Particulate organic carbon-isotope composition and its spatio-temporal variability of suspended sediment in the Xijiang river, South China[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2127-2131. (in Chinese)
- Onstad G, Canfield D E, Qu A Y, et al. Sources of particulate organic matter in rivers from the continental USA: lignin phenol and stable carbon isotope compositions[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2000, 64(20): 3539-3546.
- 刘慧, 王安, 陈菁, 等. 稻田沟渠-湿地系统的碳氮稳定同位素组成特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 220-224.
Liu Hui, Wang An, Chen Jing, et al. Stable carbon and nitrogen isotope characters in rice paddy ditch and wetland system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3): 220-224. (in Chinese)
- Falkowski P G. Species variability in the fractionation of ^{13}C and ^{12}C by marine phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 1991, 13(Supp. 1): 21-28.
- 蔡德陵, 李红燕, 周卫见, 等. 无定河流域碳氮稳定同位素研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(6): 619-626.
Cai Deling, Li Hongyan, Zhou Weijian, et al. Stable carbon and nitrogen isotopes in the Wudinghe drainage basin[J].

- Geochimica, 2004, 33(6): 619–626. (in Chinese)
- 7 Gu B, Chapman A D, Schelske C L. Factors controlling seasonal variations in stable isotope composition of particulate organic matter in a soft water eutrophic lake[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(6): 2837–2848.
- 8 Gu Binhe, Schelske C L, Waters M N. Patterns and controls of seasonal variability of carbon stable isotopes of particulate organic matter in lakes[J]. *Oecologia*, 2011, 165(4): 1083–1094.
- 9 Del Giorgio P A, France R L. Ecosystem-specific patterns in the relationship between zooplankton and POM or microplankton $\delta^{13}\text{C}$ [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(2): 359–365.
- 10 于宇,宋金明,李学刚,等. 沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J]. *生态学报*, 2012, 32(5): 1623–1632.
Yu Yu, Song Jiming, Li Xuegang, et al. Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 1623–1632. (in Chinese)
- 11 曾庆飞,孔繁翔,毛志刚,等. 稳定性氮同位素技术研究太湖梅梁湾区域营养盐差异[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 813–818.
Zeng Qingfei, Kong Fanxiang, Mao Zhigang, et al. Evaluation of nitrogen isotopes as indicators of spatial nutrient difference in Meiliangwan bay, Tai Lake, China [J]. *Agricultural Environmental Science*, 2012, 31(4): 813–818. (in Chinese)
- 12 刘辉. 溪流水库颗粒有机物碳氮稳定同位素时空变化[D]. 广州:暨南大学, 2006.
Liu Hui. Temporal and spatial variation in carbon and nitrogen stable isotope of particulate organic matter in Liuxihe reservoir [D]. Guangzhou: Jinan University, 2006. (in Chinese)
- 13 Gondwe M J, Guildford S J, Hecky R E. Planktonic nitrogen fixation in Lake Malawi/Nyasa[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 596(1): 251–267.
- 14 Carpenter S R, Cole J J, Pace M L, et al. Ecosystem subsidies: terrestrial support of aquatic food webs from ^{13}C addition to contrasting lakes[J]. *Ecology*, 2005, 86(10): 2737–2750.
- 15 Grey J, Jones R L, Sleep D. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness as indicated by stable isotope analysis[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(3): 505–513.
- 16 袁瑞强,宋献方,王鹏,等. 白洋淀渗漏对周边地下水的影响[J]. *水科学进展*, 2012, 23(6): 751–756.
Yuan Ruiqiang, Song Xianfang, Wang Peng, et al. Impacts of percolation in Baiyangdian Lake on groundwater[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 751–756. (in Chinese)

(上接第 78 页)

- 28 Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982–1998[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(1): 1–15.
- 29 Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999 [J]. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692–701.
- 30 Béziat P, Ceschia E, Dedieu G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(10): 1628–1645.
- 31 Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2–3): 115–125.
- 32 Ham J M, Kluitenberg G J. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 71(3–4): 403–424.
- 33 Niu J Y, Gan Y T, Huang G B. Dynamics of root growth in spring wheat mulched with plastic film[J]. *Crop Science*, 2004, 44(5): 1682–1688.
- 34 Mu L, Liang Y L, Zhang C W, et al. Soil respiration of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) under different mulching practices in a greenhouse, including controlling factors in China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil & Plant Science*, 2014, 64(1): 85–95.
- 35 Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(1): 79–86.
- 36 Bennett O L, Ashley D A, Doss B D. Cotton response to black plastic mulch and irrigation[J]. *Agronomy Journal*, 1966, 58(1): 57–60.
- 37 Dong H Z, Li W J, Tang W, et al. Early plastic mulching increases stand establishment and lint yield of cotton in saline fields [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 269–275.
- 38 Aubinet M, Moureaux C, Bodson B, et al. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(3–4): 407–418.
- 39 Gilmanov T G, Verma S B, Sims P L, et al. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO_2 -flux tower measurements[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1–16.
- 40 Li L, Vuichard N, Viovy N, et al. Importance of crop varieties and management practices: evaluation of a process-based model for simulating CO_2 and H_2O fluxes at five European maize (*Zea mays* L.) sites[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(6): 1721–1736.