

# 基于马尔科夫模型的武功县土地利用/ 覆被动态变化研究

朱 萌<sup>1</sup>, 马孝义<sup>1</sup>, 刘雪娇<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**基于对武功县 2006 年、2009 年两期 Landsat 5-TM 遥感影像解译获得的土地利用/覆被图,求得该区土地利用类型面积转移概率矩阵。应用马尔科夫模型对武功县未来 12 a 土地利用动态变化趋势进行模拟分析和预测。结果表明:引入模型效应系数检验该模型,模型效应系数值为 99.99%,用该模型预测土地利用动态变化是可靠的;人类活动是武功县土地利用/覆被变化的主要驱动力;武功县未来土地利用的变化趋势是农业用地逐年减少,其中耕地面积和菜地面积分别减少 5.74%,0.74%;而建设用地和交通用地则逐年增加,分别增加 6.29%,0.57%;水域和特殊用地面积变化不大。研究结果明晰了农用地和建设用地之间的矛盾及其发展趋势,可为区域土地利用规划管理提供相关科学依据。

**关键词:**遥感;土地利用/覆被;马尔科夫模型;武功县

**中图分类号:**F301.24

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2013)05-0064-05

## Dynamic Changes of Land Use/Cover Based on Markov Model in Wugong County, Shaanxi Province

ZHU Meng<sup>1</sup>, MA Xiao-yi<sup>1</sup>, LIU Xue-jiao<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Mechanical

and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:**Based on the interpretation for land use/cover map from Landsat 5-TM remote sensing images of Wugong County, Shaanxi Province in 2006 and 2009, transfer probability matrix of the areas were calculated. Then the land use dynamic change trend of Wugong Country in the next 12 years was simulated and predicted by using Markov model. The results indicated that the value of W is 99.99% by introducing model effect coefficient to test this model, proving that using this model to predict the land use dynamic change is reliable. Activity is the main cause to change in land cover pattern in Wugong County. The results show that Wugong County land use change trend of agricultural land was decreasing year by year, among this, the cultivated land area and vegetable field area were reduced by 5.74% and 0.74%. But the construction land and traffic land increased, the area increased by 6.29% and 0.57%; while the waters and special land area change is un conspicuous. This result indicates that the contradiction between agricultural land and construction land and its development trend is clear, and it is meaningful to serve as a scientific basis for land planning and management.

**Key words:**remote sensing; land use/cover; Markov model; Wugong County of Shaanxi Province

土地利用/覆被变化(LUCC, Land Use and Land Cover Change)是全球变化的主要原因之一,由于涉及到自然与人文领域的诸多问题,引起了越来越多学者的关注<sup>[1]</sup>。土地利用/覆被变化是一个动态变

化过程,因此建立模型进行模拟是有效且可靠的手段,也是深入了解土地利用/覆盖变化复杂性的重要手段,不仅可以对过去土地利用/土地覆盖变化进行描述、解释和再现,还可以对未来土地利用/土地覆盖

收稿日期:2013-01-21

修回日期:2013-03-03

资助项目:国家十二五“863”项目(2011AA100509);国家十二五科技支撑项目(2011BAD25B03);国家十二五科技支撑项目(2012BAD08B01)

作者简介:朱萌(1990—),女,湖南常德人,硕士研究生,研究方向:遥感技术在灌区管理方面的应用。E-mail:408594016@qq.com

通信作者:马孝义(1965—),男,陕西宝鸡人,教授,博士生导师,研究方向:灌区信息化技术。E-mail:xiaoyimasl@yahoo.com.cn

变化进行预测和制定对策<sup>[2]</sup>。但是目前的土地利用/覆被变化模拟预测主要集中在区域和城市尺度,而对于小尺度范围涉及较少,因此选择小尺度区域作为研究对象,是深入认识和分析土地利用变化规律的有效途径<sup>[3]</sup>。马尔科夫(Markov)模型是描述随机过程的经典方法,已被广泛应用于 LUCC 研究中<sup>[4-5]</sup>。牛星和欧名豪<sup>[6]</sup>利用 1996—2004 年变更数据对扬州市 2010—2020 年土地利用结构的预测,说明运用 Markov 理论预测扬州的土地利用结构是可行的;Guo 等<sup>[7]</sup>应用 Markov 模型预测宝鸡市金泰和渭滨地区 16 a 的土地利用变化,结果表明人类活动很大程度上影响着这个区域的生态环境。将马尔科夫模型与遥感技术相结合,通过解译遥感图像得到研究区土地利用面积转换情况,不仅可以定量说明土地利用类型之间的转化状况,还可以揭示不同土地利用类型之间的转移速率,从而更好地解释土地利用类型间的动态演变过程<sup>[8]</sup>。

# 1 研究方法

## 1.1 研究区概况

武功县地处陕西省关中西部盆地,面积约 392 km<sup>2</sup>,是陕西省重要的粮食生产基地,其农业人口 37.4 万人,占总人口的 90.9%<sup>[9]</sup>。位于“关中—天水”经济圈腹地的武功县迎来经济发展、农业产业化、土地利用转型的新契机,也为区域资源管理特别是土地合理规划带来挑战。因此,及时准确了解武功县的土地利用/覆被情况,对于合理规划农用地和建设用地具有重要意义,对未来土地利用情况进行预测,可为土地规划管理,实现土地的可持续利用提供理论依据。

## 1.2 数据来源和解译

根据中国科学院中国遥感卫星地面站提供的武功县 2006 年 7 月和 2009 年 6 月 Landsat 5-TM 遥感影像数据,其分辨率为 30 m,以陕西省各县市 1:30 万矢量图、2006 年武功县 1:5 万土地利用现状图、该地区土地利用类型的野外实地勘察数据和当地居民的咨询资料为辅助数据。在 ENVI 中首先对两幅影像进行几何精校正,校正精度小于一个像元。其次用 ArcGIS 软件根据陕西省各县市 1:30 万矢量图绘制的武功县矢量图对所选遥感影像进行裁剪以获得研究区的遥感影像。根据两个时期土地利用现状图等确定研究区域的土地利用类型和解译标志。最后,融合波段 TM1、TM4、TM7 对图像进行增强处理,采用人机交互的监督分类方法对图像进行解译获取 2006 年和 2009 年的两期土地利用/覆被现状数据。

## 1.3 土地利用/覆被类型划分

根据“国家资源环境遥感宏观调查与动态研究”建立的中国土地资源分类系统和 2007 年我国颁布执行的《土地利用分类》标准,本文将武功县的土地利用/覆盖类型划分为 7 大类:耕地、菜地、果园、水域、建设用地、交通用地和特殊用地<sup>[10-11]</sup>。

## 1.4 马尔科夫预测原理

马尔科夫预测过程是根据俄国数学家马尔科夫的随机过程理论提出来的,是一种具有“无后效应”的特殊随机过程<sup>[12]</sup>。所谓的“无后效应”是指某随机过程时刻 $(t+1)$ 的状态 $S(t+1)$ 的概率只与时刻 $t$ 的状态 $S(t)$ 有关,而与时刻 $t$ 之前的状态概率无关<sup>[13]</sup>。这点用于土地利用结构动态变化预测是合适的,因为在一定条件下,土地利用的动态演变具有马尔科夫过程的性质。具体而言,在通过转移矩阵生成区域土地利用变化转移概率矩阵的基础上,马尔科夫模型被用来预测特定情景下土地利用变化的未来趋势<sup>[14-15]</sup>。

(1) 转移概率矩阵<sup>[16-17]</sup>的确立是成功应用马尔科夫模型的关键,转移概率矩阵可以定量说明土地利用类型之间的相互转化状况,揭示转移速率,其土地利用/覆被类型转移概率矩阵的数学表达式为:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $p_{ij}$ ——土地利用/覆被类型 $i$ 转化为 $j$ 的转移概率。该矩阵的每一项元素需满足以下两个条件:  
 $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1; (i, j = 1, 2, 3, \cdots, n); 0 \leq p_{ij} \leq 1$ 。

(2) 假设已知土地利用/覆被系统中 $n=0$ 时的初始状态 $A^{(0)} = [A_1^{(0)}, A_2^{(0)}, \cdots, A_k^{(0)}]$ ,经过 $n$ 次转移后的状态 $A^{(n)} = [A_1^{(n)}, A_2^{(n)}, \cdots, A_k^{(n)}]$ 为:

$$A^{(n)} = A^{(0)} \cdot P^{(n)} \quad (2)$$

式中: $P^{(n)}$ ——初始状态土地利用/覆被概率矩阵经过 $n$ 步转移后的概率矩阵,经过 $n$ 步转移后的系统状态概率为 $A^{(n)} = A^{(n-1)} P = A^{(n-2)} P P = \cdots = A^{(0)} P^n$ ,所以 $P^{(n)} = P^n$ 。由此可见,系统在任何时刻的状态概率是由初始状态概率和转移概率确定的。

# 2 结果与分析

## 2.1 转移矩阵的建立

2.1.1 初始状态概率矩阵的确定 将土地利用/覆被类型划分为一系列相互转化的状态,各状态在系统中所占的份额即每种土地利用类型面积占全部土地

利用类型面积的百分比作为各状态的初始概率,从而构成初始状态矩阵  $A^0$ 。用 ENVI 4.7 软件中的 Class Statistics 工具统计武功县 2006 年土地利用类型面积,计算得到各覆被类型面积百分比,形成初始状态矩阵,见表 1。

2.1.2 转移概率矩阵的确定 用 ENVI 4.7 软件对武功县 2006 年和 2009 年的遥感影像分类结果图进行转移矩阵计算,获得了各种地物类型之间的转化关系,见表 2。

表 1 初始状态矩阵		%
土地利用/覆被类型		$A^0$
耕 地		66.6442
菜 地		21.4442
果 园		0.8126
水 域		1.5856
建设用地		8.0407
交通用地		0.3590
特殊用地		1.1137

表 2 2006—2009 年各土地利用/土地覆被类型转化情况								hm <sup>2</sup>
2006 年	2009 年							
	耕地	菜地	果园	水域	建设用地	交通用地	特殊用地	合计
耕 地	21453.27	3062.19	306.07	96.20	1083.49	55.21	4.41	26060.84
菜 地	3075.59	2758.72	86.31	47.88	2432.85	23.67	3.60	8428.61
果 园	105.75	57.87	120.59	0.09	34.11	0.09	0.00	318.50
水 域	54.27	92.15	0.00	377.71	97.64	0.93	0.00	622.70
建设用地	362.41	273.13	1.53	27.09	2421.24	74.60	0.36	3160.37
交通用地	9.63	11.97	0.63	2.52	41.57	74.51	0.00	140.83
特殊用地	53.19	68.04	0	1.08	56.43	0	259.01	437.74
合 计	25114.55	6324.07	515.31	555.99	6300.95	228.17	267.37	

由表 2 可知,武功县的土地利用以农用地为主,包括耕地、菜地和果园。2006—2009 年耕地面积减少了 1 080.42 hm<sup>2</sup>,减幅 4.12%,尽管如此,耕地仍是该县最主要的土地利用类型;3 a 来武功县土地利用类型变化最大的是建设用地,其面积增加了 3 140.48 hm<sup>2</sup>,这主要是由耕地和菜地转化而来的,两者转入量分别占总转入建设用地面积的 28.92%,64.94%,但同时有 74.61 hm<sup>2</sup> 的建设用地转变成了交通用地;交通用地增加了 87.01 hm<sup>2</sup>,由耕地转化来的面积为 55.21 hm<sup>2</sup>,占总转入量的 35.92%;果园面积增加了 195.92 hm<sup>2</sup>,其主要是由耕地转化得到了 20.40 hm<sup>2</sup>,其次 86.31 hm<sup>2</sup> 是由菜地转化得到的;水域面积减少了 67.23 hm<sup>2</sup>,主要是部分坑塘转变为了菜地,占总转出量的 37.74%。自然因素是土地利用/覆被类型变化的背景条件,自然因素的变化是随机的,它们对土地利用/覆被变化影响的多年平

均是稳定的,即由自然因素引起的变化幅度较小。所以短期内人类活动的影响则成为土地利用/覆被变化的主要因素,但人类活动受政策调控<sup>[18]</sup>。这是与实际情况相符的:2009 年武功县 GDP 达到 44.721 亿元,与 2006 相比增长了 69.6%。2009 年,该县狠抓薄弱环节,牢固树立“工业强县”理念,确立工业主导地位,整合各方力量抓园区、促工业,有力推动了全县经济发展的进程,第二产业所占 GDP 比重逐渐增加,其所带来的经济效益远远大于第一、第三产业,这使得有不少耕地和菜地已转变为了建筑用地。此外,武功县大力建设现代农业科技产业示范园和积极发展绿色生态有机食品产业,全力打造关中现代食品工业基地的同时,完善农业信息化建设,全面提高农业规模化、标准化、专业化生产水平,武功县农林局也在积极开展土地整治、低产田改造及“四荒地”的开发利用工作,这也加速了耕地和菜地转变为建筑用地的过程。

表 3 2006—2009 年各土地利用/土地覆被类型转移概率矩阵								
2006 年	2009 年							
	耕地	菜地	果园	水域	建设用地	交通用地	特殊用地	
耕 地	0.823199	0.117501	0.011745	0.003691	0.041576	0.002118	0.000169	
菜 地	0.364899	0.327304	0.010240	0.005681	0.288641	0.002808	0.000427	
果 园	0.332015	0.181685	0.378629	0.000293	0.107085	0.000293	0.000000	
水 域	0.087147	0.147990	0.000000	0.606563	0.156801	0.001499	0.000000	
建设用地	0.114674	0.086425	0.000485	0.008571	0.766126	0.023605	0.000114	
交通用地	0.068358	0.084974	0.004450	0.017894	0.295209	0.529114	0.000000	
特殊用地	0.121503	0.155435	0.000000	0.002467	0.128905	0.000000	0.591691	

2.2 武功县土地利用/覆被类型动态模拟

转移概率矩阵的计算:利用已求出的某时间段内的某地土地利用/覆被类型面积的转移矩阵,求出该时间段内该地土地利用/覆被类型的转移概率,即某地类转化后的各土地利用类型面积占转化前该地类的百分比。如在武功县 2006 年的土地利用/覆被类型图上,研究区内的耕地到 2009 年部分转变为菜地及果园等,后者占 2006 年耕地面积的平均百分比即为转移概率。把耕地转化为其他土地利用/覆被类型的转移概率作为第 1 行,菜地转化为其他土地利用类型的转移概率作为第 2 行,依此类推,该矩阵即为 2006—2009 年土地利用/覆被类型的转移概率矩阵,见表 3。

利用 Matlab 作为编程平台,以 3 a 为一个步长,根据公式(2)建立马尔科夫预测模型。由此可计算出今后每个阶段的土地利用/覆被类型的转移概率矩阵  $P^{(n)}$  和各土地利用/覆被类型所占的面积比例  $A^{(n)}$ ,即可模拟出各类地物之间面积比例的转化情况。例如,由初始状态经过一个步长( $n=3$ )得到的转移概率矩阵为  $P^{(1)}$ ,如表 3 所示。预测 2009 年武功县土地利用/覆被类型所占比例,结果表明实际值和预测值差异不明显,见表 4。

表 4 2009 年土地利用/覆被类型实际面积和马尔科夫过程模拟土地利用/覆被类型面积比例的比较

土地利用/ 覆被类型	2009 年实 际值 $Y$	2009 年预 测值 $Y'$	差值 $Y-Y'$	差值平方 $(Y-Y')^2 \times 10^{-2}$
耕 地	63.8943	64.1779	-0.2836	8.0429
菜 地	16.0892	16.1297	-0.0405	0.1640
果 园	1.311	1.3154	-0.0044	0.0019
水 域	1.4145	1.4078	0.0067	0.0045
建设用地	16.0303	15.7051	0.3252	10.5755
交通用地	0.5805	0.5837	-0.0032	0.0010
特殊用地	0.6802	0.6803	-0.0001	0.0000

2.3 武功县未来土地利用/覆被变化趋势预测

为了对马尔科夫模型进行评价,引入模型效应系数  $W$  作为判断模型模拟效果优劣的量化指标<sup>[19-20]</sup>。 $W$  值可以反映土地利用/覆被类型面积比例实际值与预测值的吻合程度,其计算式如下:

$$W=1-\frac{\sum(Q_o-Q_e)^2}{\sum(Q_o-\overline{Q_o})^2} \tag{3}$$

式中: $Q_o$ ——实际值; $Q_e$ ——预测值; $\overline{Q_o}$ ——实际值的平均值。 $W$  值越接近 1 模拟的效果越好,说明  $Q_o$  与  $Q_e$  之间差异不显著,两者吻合情况越好。经计算, $W$  为 99.99%,即表明通过马尔科夫模型模拟和预测土地利用/覆被的动态演变是可行的。

对模型验证后,在保持当前人为影响不变的情况

下,运用马尔科夫模型预测出 2012 年、2015 年、2018 年、2021 年武功县各土地利用/覆被类型面积比例,见表 5。

表 5 未来 12 a 土地利用/覆被类型变化比例预测 %

土地利用/ 覆被类型	2012	2015	2018	2021
耕 地	61.1991	58.6095	56.8016	55.4588
菜 地	14.7800	14.3383	14.1497	14.0385
果 园	1.4272	1.4194	1.3886	1.3556
水 域	1.3295	1.3088	1.3092	1.3213
建设用地	19.9789	22.9460	24.8780	26.2673
交通用地	0.8633	1.1094	1.2954	1.4350
特殊用地	0.4220	0.2686	0.1775	0.1235

由马尔科夫模型预测结果可以看出,未来 12 a 里武功县的耕地、菜地、果园呈逐年减少的趋势,而建设用地和交通用地则呈逐年增加的趋势,这与前期土地利用/覆被变化趋势相似。其中耕地面积减少幅度较大,由 2012 年的 61.20% 下降到 2021 年的 55.46%,但其仍然是该县最大的土地利用类型;菜地和果园面积分别由 2012 年的 14.78% 和 1.43% 下降到 2021 年的 14.04% 和 1.36%;这三者主要转化为建设用地,建设用地由 2012 年的 19.98% 增长到 2021 年的 26.27%,这说明武功县的城市化进程在进一步扩大;交通用地在各地物类型中面积较少,但是一直处于持续增长的状态,由 2012 年的 0.86% 增长到 2021 年的 1.44%,表明交通用地在武功县土地利用类型中的优势明显,推动了该县经济发展的进程;较其它土地利用类型,该县水域变化程度最小,说明武功县对各流域水资源保护措施实施效果良好。

预测趋势表明,人为干扰仍然是影响武功县土地利用/覆被变化的主要因素,随着武功县经济的快速发展,城市化进程的不断加快,其土地利用的动态变化较为明显,以大量农用地转换为建设用地为主要特征,这说明了该县耕地保护和经济建设的矛盾在不断加剧,政府应加强土地利用宏观规划和管理以缓解土地利用的供需矛盾。

3 结 论

(1) 应用马尔科夫模型模拟武功县土地利用/覆被类型变化结果与实际情况基本吻合,这说明将马尔科夫过程用于小尺度土地利用/覆被格局变化的预测是一种有效且实用的方法。

(2) 根据马尔科夫模型预测武功县土地利用动态变化趋势,该县耕地,菜地,果园面积逐年减少,而建设用地和交通用地却逐年增加,反映了该县的城市化建设和经济建设对土地的需求与农业用地之间矛

盾日益突出。因此,该结果可为管理部门制定土地利用合理规划和宏观决策提供科学依据。

(3) 马尔科夫模型的建立是假定在保持当前人为影响不变的前提下,即在转移概率矩阵不变的情况下进行预测,故存在一定的局限性。本研究仅选取2006年和2009年两个时相的遥感影像,时间尺度是马尔科夫模型建立的重要环节,在今后的研究中可选取较长的时间尺度或多个时间尺度进行不同的预测研究。

#### 参考文献:

- [1] 塔西甫拉提·特依拜,丁建丽. 土地利用/土地覆盖变化研究进展综述[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2006,23(1):5-15.
- [2] 韩春建,吴克宁,刘德元,等. 基于马尔科夫模型的郑州市郊区多方案耕地保有量预测[J]. 土壤,2011,43(3):453-458.
- [3] 于兴修,杨桂山. 中国土地利用/覆被变化研究的现状与问题[J]. 地理科学进展,2002(1):51-57.
- [4] Luijten J C. A systematic method for generating land use patterns using stochastic rules and basic landscape characteristics: Results for a Colombian hillside Watershed[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2003,95(2):427-441.
- [5] 王友生,余新晓,贺康宁,等. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(12):330-336,442.
- [6] 牛星,欧名豪. 基于 MARKOV 理论的扬州市土地利用结构预测[J]. 经济地理,2007,27(1):153-156.
- [7] Guo Z Y, Dai X Y, Wu J P. Study on land use/land cover change in Jintai and Weibing Districts of Baoji City in Western China based on remote sensing technology and Markov method[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2009,3(1):33534-33545.
- [8] 刘家福,王平,李京,等. 基于 Markov 模型的长岭县土地利用时空变化研究[J]. 水土保持研究,2009,16(3):16-19.
- [9] 张淑光,王恒俊,牛英杰. 武功土壤[M]. 西安:西安科学技术出版社,1986.
- [10] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,1996.
- [11] 张银辉,罗毅,刘纪远,等. 内蒙古河套灌区土地利用与景观格局变化研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):61-65.
- [12] Hulst R. On the dynamics of vefetation; Markovchains as models o f succession[J]. Vegetation,1979,40(1):3-14.
- [13] Geng Xian-min, Li Liang. Markov process functional-sin finance and insurance[J]. Appl. Math. J. Chinese Unit,2009,24(1):21-26.
- [14] 喻锋. 基于 Markov-CA 的土地利用变化预测研究[J]. 国土资源情报,2009(4):38-46.
- [15] 罗平,姜仁荣,李红春,等. 基于空间 Logistic 和 Markov 模型集成的区域土地利用演化方法研究[J]. 中国土地科学,2010(1):31-36.
- [16] 王晓峰,任志远,黄青. 农牧交错区县城土地利用变化及驱动力分析:以陕北神木县为例[J]. 干旱区地理,2003,26(4):402-407.
- [17] 邵鲁豪,徐旌. 基于 Markov 模型的安宁市土地利用预测[J]. 云南地理环境研究,2010,22(2):87-89.
- [18] 郭笃发. 利用马尔科夫过程预测黄河三角洲新生湿地土地利用/覆被格局的变化[J]. 土壤,2006(1):42-47.
- [19] 刘晓阳,毛节泰,李纪人,等. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流[J]. 北京大学学报:自然科学版,2002,38(3):342-349.
- [20] 李涛,张建丰,杨艳芬,等. 土壤容重对深层坑渗灌入渗特性影响的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2010,15(6):89-94.
- [15] Daniel H, Martin K. Landscape fate of nitrate fluxes and emissions in Central Europe: A critical review of concepts, data and models for transport and retention [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2001,86(1):1-21.
- [16] Katharyn E B, Peggy F. Macroalgal-mediated transfer of water column nitrogen to intertidal sediments and salt marsh plants[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology,2005,321(1):59-69.
- [17] 白军红,欧阳华,邓伟,等. 向海沼泽湿地土壤中硝态氮的水平运移规律[J]. 中国环境科学,2004,24(4):414-418.
- [18] 陈效民,邓建才,张佳宝,等. 黄淮海平原主要土类中硝态氮水平运移规律[J]. 环境科学,2002,23(5):96-99.
- [19] 陈效民,潘根兴,沈其荣,等. 太湖地区主要水稻土中硝态氮水平运移规律研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1):95-97.
- [20] Lehmann J, da Silva J P, Rondon M, et al. Slash-and-char: A feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon [C]. Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 2002.
- [21] 孙志高,刘景双. 三江平原典型湿地土壤硝态氮和铵态氮垂直运移规律[J]. 水土保持学报,2007,21(6):25-30.
- [22] 郑继勇,王丽梅,邵明安. 应用亮兰染色剂指示溶质迁移边界层的研究[J]. 水科学进展,2004,15(1):100-104.

(上接第 63 页)