

生物炭对黄土高原不同质地土壤中 NO₃-N 运移特征的影响

李文娟¹, 颜永毫¹, 郑纪勇^{1,2}, 张兴昌^{1,2}, 李世清^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 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)

摘要: 为了解生物炭在抑制黄土高原农田土壤可溶态养分淋失方面的功效, 通过人工模拟实验, 研究土壤中添加生物炭后对硝态氮运移的影响, 为黄土高原地区农田非点源污染防治及氮循环研究等提供科学依据。选择黄土高原地区三种不同质地土壤类型(风砂土、黄绵土、瘠土), 通过室内土柱模拟研究方法, 用连续流动分析仪(SKALAR-SAN⁺⁺)测定出流液的硝态氮浓度, 通过硝态氮的穿透曲线分析在稳态条件下, 生物炭添加及不同添加量对土壤中硝态氮运移的影响。结果表明: 对于质地较粗黄绵土和风砂土, 生物炭输入能够降低硝态氮的淋失, 随添加量增加, 其阻滞作用越强。对于质地较为粘细的瘠土, 添加生物炭反而促进了硝态氮淋失, 随添加量增加, 其促进作用越强。稳态条件下, 三种土壤的硝态氮穿过程均符合对流弥散方程。研究表明加入生物炭对不同质地土壤中可溶态养分的影响不同, 可以促进质地较粗土壤的保肥能力, 却不利于质地较为粘细土壤硝态氮养分的保持。

关键词: 黄土高原; 土壤; 生物炭; 硝态氮; 运移

中图分类号: S153.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)05-0060-04

Effect of Biochar on the Transfer of Nitrate in Three Different Soils on the Loess Plateau

LI Wen-juan¹, YAN Yong-hao¹, ZHENG Ji-yong^{1,2}, ZHANG Xing-chang^{1,2}, LI Shi-qing^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To determine how addition of biochar can restrain the leaching of soluble nutrients in farmland soil on the Loess Plateau, the simulation experiments were used to study the effect of biochar made from apple tree's branches with three addition rates on transfer of nitrate in three soils with different texture from the Loess Plateau through comparing BTCs (Break through curve, BTC), by means of soil colume simulation in the steady contion in lab, and provide the scientific basis for non-point source pollution control and the nitrogen cycle research. The continuous flow analyzer (SKALAR-SAN) was used to measure sap nitrate concentration, nitrate break-through curves were analyzed under steady state conditions, biochar addition and different amounts of nitrate in soil migration. The results showed that biochar can restrain the leaching of nitrate in soils with coarse texture such as leossil soil and sandy soil, moreover, the restrain function would increase with the biochar addition rate. However, the biochar showed the aceleation function on leaching of nitrate in clay loam soil, and this function would increase with the addition rate. After biochar additon, the nitrate transfer in soils can be described by convective-dispersive equation (CDE). Studies have shown that adding biochar in soil with different textures different effects on soluble nutrients can promote capacity of coarse texture soil to keep the nutrients, but not be conducive to nitrate nutrient retention in the fine soil with more sticky texture.

Key words: Loess Plateau; soil; biochar; nitrate; transfer

收稿日期: 2013-04-15

修回日期: 2013-05-16

资助项目: 国家自然科学基金(41071195); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13); 校科研专项项目(QN2011145)

作者简介: 李文娟(1986—), 女, 陕西武功人, 硕士研究生, 主要研究方向为生物炭土壤环境效应。E-mail: 578382278@qq.com

通信作者: 郑纪勇(1974—), 男, 山东聊城人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事农田生态系统物质迁移方面的研究。E-mail: zhjy@ms.iswc.ac.cn

氮素化肥利用率低下问题是一个世界难题。国际上氮肥的作物利用率约在 33% 左右^[1-2], 每年氮肥的流失所造成的经济损失超过 159 亿美元^[3]。我国是一个农业大国, 为解决占世界 21% 人口的粮食问题, 氮肥的施用量从 1978 年的 5×10^6 t 增长到 2007 年的 2.3×10^7 t^[4], 在许多地区尤其是我国东南沿海等农业高产地区其施用已呈过量之势。过量的氮肥施用和低下的作物利用率造成了氮素向环境中的流失, 由此引发环境水体富营养化问题和大气 N_2O 、 NO 和 NH_3 的污染^[5]。硝态氮是造成地下水污染的主要污染源, 其在土壤中的运移行为是当前环境科学和土壤学研究的热点^[6]。与硝态氮相比, 铵态氮更易被土壤吸附, 它只有在特定条件如土壤水分接近饱和的情况下借助下渗流的驱动才可能在土壤剖面中随水迁移^[7]。尽管如此, 铵态氮的运移行为对于一系列物理和化学过程如无机氮有机化、硝化—反硝化作用及离子交换反应等也有着重要影响^[8], 对其研究已越来越受到重视。生物炭是作物秸秆等有机物质及其衍生物在无氧条件下碳化的产物, 它具有改善土壤质量、保持土壤肥力等诸多作用^[9-12]。作为一个农业大国, 我国年产秸秆 5 亿 t 以上。如果生物炭施用于土壤能够减少氮素的流失、提高氮肥利用率, 则不仅有助于解决氮肥的过量利用和由此造成的有关环境问题, 而且为我国庞大秸秆资源的有效利用提供了一个新途径。

目前, 国内外学者已经对土壤中硝态氮和铵态氮

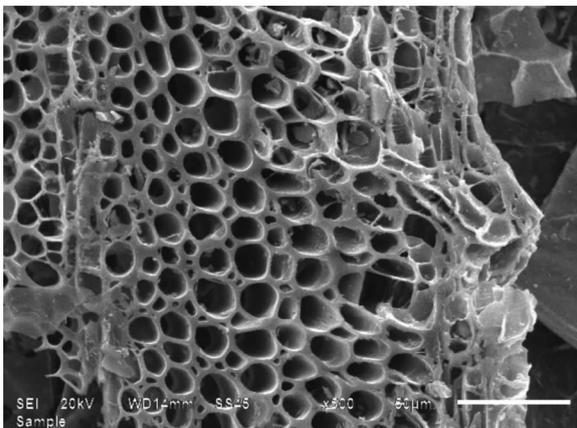
的水平扩散过程及运移机制进行了许多研究^[13-19], 但关于生物炭输入后土壤硝态氮和铵态氮运移过程的研究还不多见。Lehmann 等^[20]的研究表明, 生物炭具有很强的吸附能力, 可以吸附铵根离子、硝酸盐, 具有一定的保肥性能, 施加到土壤中能够有效减少氮素的流失。为了研究生物炭对氮素在土壤中的运移影响程度, 本研究以添加不同量和不同粒径生物炭的土壤为研究对象, 目的在于揭示输入生物炭后, 三种土壤中硝态氮运移规律, 并阐明其影响因素, 为该区农田非点源污染防治及氮循环研究等提供科学依据。

1 材料与方法

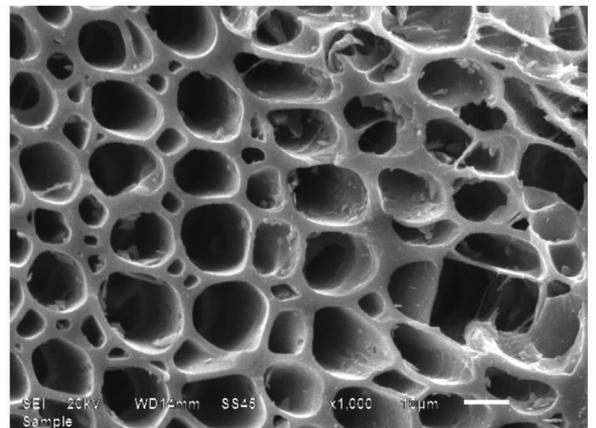
1.1 试验材料

1.1.1 生物炭 实验所用生物炭为以苹果枝为原料生产, 工艺流程为干燥除水—挤压成型—装釜加热至 550°C (6~8 h)—停火冷却, 约 30% 出炭率。生物炭粉碎后过 2 mm 筛后保存备用, 经测试 (MS-2000 激光粒度分析仪), 粉碎后的生物炭颗粒大小分布见图 1, 总碳 562.49 g/kg, 总氮 2.34 g/kg。从粒径分布看, 生物炭颗粒大小接近风沙土, 粗于黄绵土和塬土 (表 1)。

1.1.2 供试土壤 供试土样为耕作层 (0—20 cm) 的陕北安塞黄绵土、榆林风沙土和杨凌塬土。土样风干后过 2 mm 筛, 105°C 烘干法测吸湿水含量, 粒度分析采用吸管法。测定结果见表 1。



苹果树枝生物炭 (50 μm)



苹果树枝生物炭 (10 μm)

图 1 生物炭微观结构 (扫描电子显微镜)

表 1 供试样品基本理化性质

土壤类型	主要矿物类型	砂粒含量/ %	粉粒含量/ %	黏粒含量/ %	土壤质地 (国际分类)
塬土	伊利石, 蛭石	32.55	35.08	32.36	壤质黏土
黄绵土	伊利石, 绿泥石	60.61	20.51	18.88	砂质黏壤土
风沙土	石英, 长石	92.15	4.52	3.34	砂土
生物炭		86.29	11.93	1.78	

1.2 试验方法

生物炭添加比例为 2%, 5% 和 8% (W/W), 无生物炭添加作为对照。采用稳态条件下的垂直土柱易混置换试验, 运移溶液为 0.03 mol/L 的硝酸铵溶液。土柱高 15 cm, 内径 5 cm。3 种土壤的土柱填装容重均为 1.35 g/cm³, 采取分层填装, 控制容重为采样时的原状土壤容重。试验开始前先把土柱放在水槽中, 控制水槽水面略低于土柱, 从下至上饱和排气 8 h, 采用马氏瓶控制水头, 水头为 3 cm。试验开始后用 30 ml 塑料瓶接取出流液, 稀释 100 倍后用连续流动分析仪 (SKALAR-SAN⁺⁺) 测定出流液的硝态氮^[21-22]。

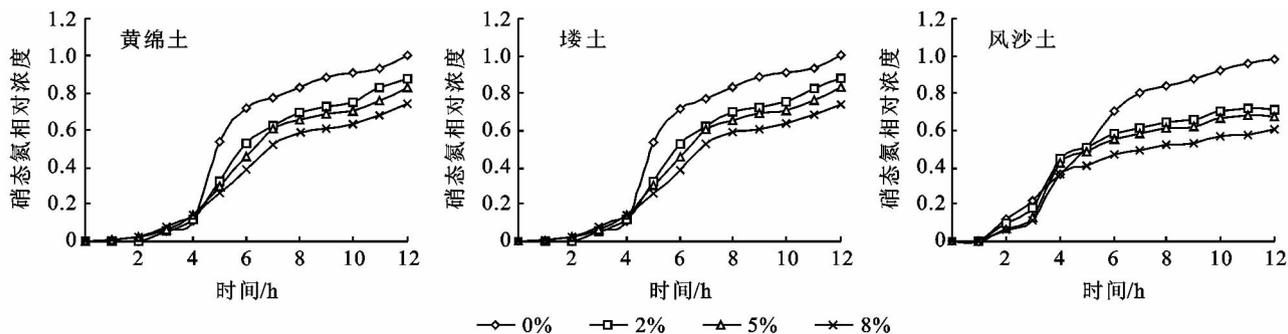


图 2 不同生物炭添加比例下黄绵土、塋土和风沙土的硝态氮穿透曲线

图 2 中, 各处理穿透曲线呈现的基本趋势是渗出液的相对浓度随时间逐渐增大, 随后趋于平缓。随着生物炭输入比例的增大, 黄绵土和风沙土的硝态氮穿透能力降低, 穿透时间增加; 随着生物炭输入比例的增大, 黄绵土的硝态氮穿透能力增强, 穿透时间减少。由此说明生物炭输入对黄土高原典型土壤 (风沙土、黄绵土、塋土) 硝态氮的运移有显著的影响, 但随质地不同, 其影响不同。对于质地较粗的风沙土和黄绵土而言, 高比例的生物炭输入会增加硝态氮的穿透时间, 说明生物炭阻滞了硝态氮的运移; 然而, 对于质地较为粘细的塋土来说, 高比例的生物炭输入会显著减少硝态氮的穿透时间, 增加其穿透能力。

图 2 的穿透曲线中, 由于溶质锋到达出溜端需要一定时间, 运移初期起始浓度低, 随着时间推移, 由于溶质在多孔介质中水动力弥散和扩散作用, 渗出液浓度逐渐上升。但三种土壤类型中, 硝态氮的初始穿透时间不同, 在黄绵土和塋土的初始穿透时间均大于 2 h, 而对于风沙土在运移 2 h 内已经穿透, 三种土壤类型硝态氮初始穿透时间的不同也说明了土壤类型差异对硝态氮运移的影响, 说明质地越粗, 越利于硝态氮的迁移。相较而言, 生物炭添加对塋土溶质迁移过程的影响最大, 不同添加比例间穿透过程的差异最大, 黄绵土最小, 而风沙土次之。

生物炭对溶质迁移过程的影响主要是通过两个方面的因素, 一是其颗粒组成, 可以改变原土壤的孔

2 结果与分析

2.1 土壤硝态氮运移规律

2.1.1 土壤硝态氮穿透曲线特性分析 对溶质在土壤中的运移研究, 一般是通过测定其在土壤中的相对浓度 (即渗出液浓度与初始浓度的比) 随时间而变化的穿透曲线。本文以硝态氮在土壤中相对浓度和穿透时间为坐标轴, 得到了一系列溶质穿透曲线图。图 2 是硝态氮在三种土壤类型 15 cm 土柱中的运移过程, 反映了稳态条件下生物炭添加对硝态氮在土壤迁移过程的影响。

隙大小分布特征, 二是其多孔高比表面特征, 可以一定量的容重。对于黄绵土, 随生物炭添加比例的增大, 在控容重条件下, 密度较轻的生物炭越多, 土壤孔隙比越小, 导致土壤中水流速度降低, 吸附时间增加。对于塋土, 随着生物炭输入塋土比例的增大, 硝态氮穿透曲线的变化显著, 运移穿透点出现的时间提前, 促进了硝态氮在塋土中的迁移。这是因为塋土质地较为黏细, 结构较好, 大孔隙比例较低的缘故。塋土中添加生物炭后, 生物炭颗粒较粗, 增加了样品中大孔隙的比例。土壤中存在明显的大孔隙时溶质便会优先穿透, 此时吸附作用对溶质运移的影响作用将会较小, 硝态氮的穿透能力反而提高, 穿透时间降低。对于风沙土, 随着生物炭输入比例的增大, 硝态氮穿透曲线的变化显著, 穿透能力降低, 穿透时间增加。其原因除与黄绵土类似外, 另一原因可能是生物炭添加改变了原有孔隙结构, 有效地降低了大孔隙比例。

2.1.2 土壤硝态氮运移参数分析 为定量确定生物炭对土壤硝态氮运移特征的影响, 利用传统对流弥散方程及 CXTFIT 程序估计了运移参数。传统的对流弥散模型常用来描述稳态条件下非反应性溶质的土壤运移过程, 在不考虑其它汇源项的条件下, 具体对流弥散方程表达为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

式中: C ——液相溶质浓度; D ——扩散弥散系数; v ——平均孔隙水流速; x, t ——距离和时间。CXT-FIT 程序是用给定的初始值代入选定运移模型, 通过计算值与实测值进行对比, 采用最小二乘法逼近, 最后得到各运移参数的最佳拟合值。 λ 为弥散度, 是表征运移离子在运移过程中弥散强度的一个量。SSQ 为拟合值与实测值的剩余平方和, 其值越小说明拟合程度越高。对于 3 种土壤类型的土柱进行硝态氮穿透曲线的拟合结果见表 2。

表 2 硝态氮穿透曲线拟合运移参数

土壤类型	添加比例/%	$D/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	$V/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	λ/cm	SSQ
黄绵土	0	6.61×10^{-2}	0.46	0.216	7.15×10^{-2}
	2	4.53×10^{-2}	0.38	0.238	4.31×10^{-2}
	5	3.29×10^{-2}	0.35	0.253	6.12×10^{-2}
	8	2.61×10^{-2}	0.32	0.271	2.32×10^{-2}
塋土	0	9.61×10^{-2}	0.57	0.168	7.42×10^{-3}
	2	1.03×10^{-1}	0.43	0.153	4.31×10^{-3}
	5	1.19×10^{-1}	0.32	0.139	6.12×10^{-3}
	8	1.31×10^{-1}	0.29	0.121	2.32×10^{-3}
风砂土	0	2.61×10^{-1}	3.12	0.098	1.02×10^{-2}
	2	1.14×10^{-1}	1.56	0.127	2.31×10^{-2}
	5	7.63×10^{-2}	0.86	0.143	1.52×10^{-2}
	8	2.67×10^{-2}	0.52	0.161	4.18×10^{-2}

由表 2 可知, 当没有生物质炭输入时, 3 种土壤类型所拟合的参数 D 从大到小依次是: 风砂土、塋土、黄绵土。拟合参数 λ 中, 黄绵土的值最大, 而风砂土的值仅为它的 0.45 倍。在图 2 的土壤硝态氮穿透曲线中, 从溶质完成穿透的快慢上也可区分三种土壤弥散强度的大小。其原因可能是由于黄绵土中的黏粒含量明显高于风砂土, 使得黄绵土中的小孔隙多且孔隙的曲折度也大, 所以硝态氮在黄绵土中受到的弥散度也相应提高。

当土壤中输入生物质炭后, 三种土壤类型所拟合的参数 D 也基本符合风砂土 > 塋土 > 黄绵土的规律, 同时拟合参数 λ 也基本有风砂土 < 塋土 < 黄绵土。随着生物质炭输入比例的增加, 黄绵土和风砂土的拟合参数 D 减小, λ 增大; 塋土的拟合参数 D 增大, λ 减小。以上分析表明, 在水分饱和的条件下, 随着生物质炭输入比例的增加, 黄绵土和风砂土的弥散度逐渐增大, 从而削弱了土壤硝态氮的运移能力; 塋土的弥散强度减小, 加强了土壤的硝态氮运移能力, 表层土壤硝态氮迁移能力的加强将不利于有效氮的保持。

3 结论

(1) 在水分饱和条件下, 三种土壤的硝态氮穿透曲线均符合对流弥散方程 ($R^2 \geq 0.87$), 生物炭对硝态氮运移过程影响显著; (2) 由于所加生物炭对质地较

粗和细黏土壤孔隙大小分布改变方向不同, 对于质地较粗黄绵土和风砂土, 生物炭输入可以降低硝态氮的淋失, 随生物炭添加量增加, 其阻滞作用越强。对于质地较为粘细的塋土, 生物炭添加可以促进硝态氮淋失, 加强了土壤的硝态氮运移能力, 表层土壤硝态氮迁移能力的加强将不利于有效氮的保持。

参考文献:

- [1] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 132-140.
- [2] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(3): 357-363.
- [3] Delgado J A. Quantifying the loss mechanisms of nitrogen[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6): 389-398.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2007 年[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [5] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 278-284.
- [6] Chang C, Entz T J. Ammonium nitrogen leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in Southern Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(1): 145-153.
- [7] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(6): 554-558.
- [8] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [9] Hayes M H B. Biochar and biofuels for a brighter future[J]. *Nature*, 2006, 443(7108): 144-144.
- [10] Woods W I, Falcao N P S, Teixeira W G. Biochar trials aim to enrich soil for smallholders[J]. *Nature*, 2006, 443(7108): 144-144.
- [11] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 43-357.
- [12] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [13] 白冰, 陈效民, 王恒祥. 莱州湾滨海盐渍土中铵态氮水平运移室内模拟试验[J]. *农村生态环境*, 2004, 20(4): 41-55.
- [14] Fustec E, Mariotti A, Grillo X, et al. Nitrate removal by denitrification in alluvial ground water: Role of a former channel[J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 123(3/4): 337-354.

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] 郜鲁豪,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)