

纳帕海湖滨草甸湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应

张昆^{1,3}, 田昆², 吕宪国^{1*}, 佟守正¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 2. 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对滇西北高原纳帕海国际重要湿地湖滨草甸土壤氮动态进行了为期 2 a 的定位监测, 分析了水文周期对草甸土壤氮转化过程的驱动规律. 结果表明, 湖滨草甸湿地表现出以土壤干湿交替为主的水文周期变化特征. 水文周期对 0~ 20 cm 表层土壤全氮赋存有显著影响, 表层土壤全氮含量变幅为 0.96~ 1.30 g/kg, 呈不规则“W”型变化模式, 在雨季表层土壤全氮与水位波动趋势一致. 旱季地下水位较低时, 草甸土壤有机氮矿化作用强烈, 土壤水解氮含量相对较高. 在雨季草甸土壤水解氮含量与水位波动趋势相反, 8 月湖水退落土壤水解氮含量最高, 0~ 20 cm 和 20~ 40 cm 土层分别为 222.19 mg/kg 和 47.41 mg/kg, 湖水再次上涨土壤中水解氮含量下降幅度分别为 42% 和 48%, 表明雨季后期水位波动加速了土壤水解氮向湿地水体中的运移速率, 增加了湿地水体氮营养负荷.

关键词: 水文周期; 草甸; 全氮; 水解氮; 湿地; 纳帕海

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2216-05

Response of Meadow Soil Nitrogen to Hydro-periods in Napahai Plateau Wetland

ZHANG Kun^{1,3}, TIAN Kun², LÜ Xian-guo¹, TONG Shou-zheng¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. National Plateau Wetland Research Center, Kunming 650224, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A two-year field located monitoring was carried out to study the impacts of hydro-periods on the lakeshore meadow wetland soil total nitrogen (TN) and hydrolysable nitrogen (HN) in Napahai plateau wetland in northwestern Yunnan province. The results show that meadow soil alternate drying-wetting is the significant characteristic influenced by hydro-periods. Hydro-periods of meadow wetland control the physical environment of meadow soil, and the occurrence of TN in the upper layer (0-20 cm) was influenced more significantly than in the deeper layer (20-40 cm) by wetland hydro-periods. The dynamics of TN (0.96-1.30 g/kg) show a shape of anomalous “W” in the upper layer. And in the rainy season, the dynamics of TN was the same as the trend of water level fluctuation, while the HN was in the reverse trend. The enzyme activities were influenced by hydro-periods and then controlled the mineralization process of organic nitrogen. In August when wetland water fell, the highest amount of HN was 222.19 mg/kg (0-20 cm layer) and 47.41 mg/kg (20-40 cm layer) respectively. But when the wetland water level rose, the HN was moved to wetland water by the rising water level, and the decrease amplitude was 42% and 48% respectively. Therefore the deterioration of the environment of water was aggravated.

Key words: Hydro-periods; meadow; total nitrogen; hydrolysable nitrogen; wetland; Napahai

氮是湿地土壤关键生源要素, 是湿地生态系统重要的生态因子之一^[1]. 作为湿地营养水平指示剂, 氮是湿地植物初级生产过程中最主要的限制性养分^[2]. 湿地土壤中氮含量及其转化过程显著影响着湿地生态系统结构和功能^[3], 而水文过程控制着湿地土壤氮的转化过程及其对植物的可利用性^[4~7]. 目前对湿地土壤氮的含量及其迁移转化过程的研究主要集中在滨海盐沼湿地和内陆平原沼泽湿地^[8~12], 而对地处江河源头的高原湿地研究则相对缺乏. 水文周期是指湿地水位在时间序列上的变化格局^[5,13], 对土壤氮营养水平具有重要影响^[4]. Piehler 等^[14] 和 Vitousek 等^[15] 研究表明氮是引起地表

水体污染的主要环境污染物, 其中无机氮则是造成水体污染的首要诱因^[16~20]. 湖滨湿地作为水文过程变化的敏感地带, 探讨湖滨湿地土壤氮含量及其转化对水文周期变化的响应可为揭示氮在湿地土壤中的迁移规律、土壤质量评价、水体环境保护以及氮的生物地球化学循环研究提供科学依据.

位于青藏高原南缘的纳帕海国际重要湿地为低

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-11-29
基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 前期研究专项 (2008CB417210); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB422005); 云南省科技计划项目 (2008CA006)
作者简介: 张昆 (1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湿地变化及其环境效应, E-mail: zhkunlx@163.com
* 通讯联系人, E-mail: luxg@neigae.ac.cn

纬度高海拔的季节性内陆湖泊湿地, 地处金沙江上游, 湿地水体营养状况对维持金沙江中下游河流的健康生态环境具有重要调控作用. 近年来人类活动显著影响纳帕海湿地的生态环境, 严重干扰着草甸湿地正常的水文过程, 水位波动幅度大, 土壤干湿交替频繁. 研究高原湖滨退化湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应不但可以深入理解氮的生物地球化学过程, 而且对于揭示土壤氮的运移行为具有重要的理论指导意义. 在深入认知水文周期影响下的草甸土壤氮转化过程的基础上, 通过科学调控湿地水位时空变化以改变土壤的物理环境从而控制土壤氮的转化过程, 能够有效遏制纳帕海高原湿地水体的污染态势, 对维护区域水生态安全具有深远影响.

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区生态环境特征

纳帕海湿地(99°37′~99°41′E, 27°49′~27°55′N)位于滇西北香格里拉县城西部的纳帕海自然保护区内, 2005年被列入国际重要湿地名录. 纳帕海湿地发育在高原夷平面陷落部分, 四周山岭环绕, 面积3760.4 hm², 相对孤立狭小, 并且湖盆为石灰岩母质, 生态环境极为脆弱^[5,21]. 纳帕海湿地地处青藏高原南缘, 海拔3260 m, 独具高寒、年均温低、霜期长、降水少、干湿季分明、气温年较差和日较差大和冬季漫长而寒冷等特点, 其年均温为5.4℃, 最冷月平均温度为-3.8℃, 最热月平均温度为13.2℃. 湿地水量补给主要依靠降水, 其次为地表径流、冰雪融水以及湖盆两侧沿断裂带上涌的泉水, 年平均降水量为619.9 mm. 作为典型的季节性湖泊湿地, 纳帕海湿地水面波动幅度大, 雨季湖面可达3125 hm², 而旱季仅有500 hm²的水面, 因此, 湖水退落后大面积的湖滨草甸得以发育. 草甸植物种类丰富, 景色秀美, 鹅绒委陵菜(*Potentilla anserine*)、斑唇马先蒿(*Pedicularis longiflora* var. *tubiformis*)、尼泊尔酸模(*Rumex nepalensis*)、发草(*Deschampsia caespitosa*)和矮地榆(*Sanguisorba filiformis*)等为优势植物.

1.2 研究方法

对纳帕海高原湿地水文和气候的背景资料进行先期收集, 通过对纳帕海湖滨草甸湿地进行实地勘察, 考虑到植被类型和地形地貌的影响, 依据代表性和典型性原则在湖滨草甸湿地共选取7个长期定位监测点, 定位点均布置在鹅绒委陵菜(*Potentilla anserine*)群落中, 每个监测点设置3个重复. 于2003年和2004年开展为期2 a的定位监测以研究水文周

期变化对土壤氮营养变化的影响, 分别于3、6、7、8和10月利用原状土取土器^[5,21]进行野外实地土样采集. 在定位监测点采集土样的同时记录草甸土壤水位情况以研究湖滨草甸湿地水文周期变化特征. 为研究不同层次土壤氮动态对水文周期变化响应的差异性将所采土样按0~20 cm及20~40 cm分层, 共计280个土样, 将土样带回实验室内自然风干, 去除石块、残根等杂物, 磨碎, 过0.25 mm孔筛, 装袋备用待测. 依据中国科学院南京土壤所的土壤分析方法^[22], 测定分析土壤样品的全氮(凯氏法)和水解氮(碱解蒸馏法). 运用SPSS 11.5和Excel 2003对实验数据进行统计分析处理及制图工作.

2 结果与分析

2.1 湖滨草甸湿地水文周期变化特征

纳帕海湿地地处滇西北迪庆高原, 受西南季风、西风带南支以及西太平洋副高的综合影响, 全年降水少且分配不均, 干湿季节分明, 从6月开始形成大量降水, 6~9月降水最为充沛, 降水量最大, 为明显雨季, 11月~次年5月为明显干季(图1). 雨季开始后, 湖面迅速扩展, 到7月份, 湖滨草甸地下水位较高, 部分负地貌明显区域积水. 纳帕海湖盆发育于石灰岩母质的中甸高原上, 受喀斯特作用的强烈影响, 在其西北部形成9个天然落水洞, 并且当地居民为垦殖湿地、放牧以及开展旅游活动, 人为疏淤落水洞以求快速退水, 湖水由落水洞快速潜流汇入金沙江, 湖水退落显著. 随着落水洞的逐渐淤积, 以及8月后期和9月初秋季季风退缩带来的大量降水^[23], 湖水小幅上涨, 草甸湿地地下水位随之回升. 受湖水上涨与退落的影响, 湖滨草甸湿地水位波动幅度大, 在时间格局上具有显著的波动性(图2), 草甸土壤干湿交替现象明显.

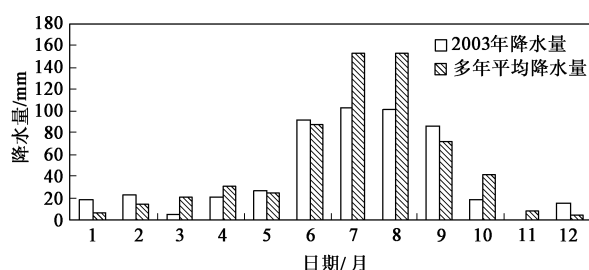


图1 纳帕海湿地降水变化特征

Fig. 1 Characteristics of precipitation in Napahai wetland

2.2 水文周期对湖滨草甸湿地土壤全氮的影响

在水文周期作用下纳帕海湖滨草甸0~20 cm

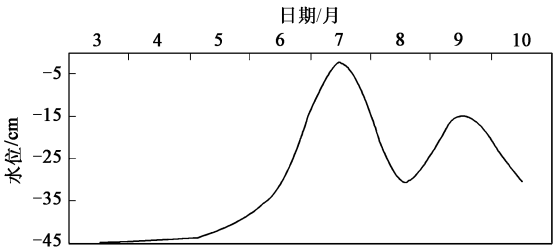


图 2 湖滨草甸湿地水文周期特征

Fig.2 Characteristics of hydro-periods in meadow wetland

表层土壤全氮呈不规则的“W”型变化模式(图3),其变化幅度为0.96~1.30 g/kg, 20~40 cm的波动范围为0.31~0.44 g/kg. 3~6月间草甸表层土壤全氮含量下降较明显,其下降幅度为17%;草甸土壤全氮在7月份达到最高值,0~20 cm表层和20~40 cm深层土壤全氮含量分别为1.30 g/kg和0.44 g/kg. 雨季草甸表层土壤全氮的动态变化与水位波动趋势一致(图2和图3). 7月后期草甸地下水位下降导致8月份草甸0~20 cm和20~40 cm土层全氮含量分别下降了14%和29%. 水文周期对0~20 cm表层土壤全氮的驱动作用较为强烈,在时间格局上全氮含量动态变化差异显著($p < 0.05$),而对20~40 cm深层土壤全氮的驱动作用较弱.

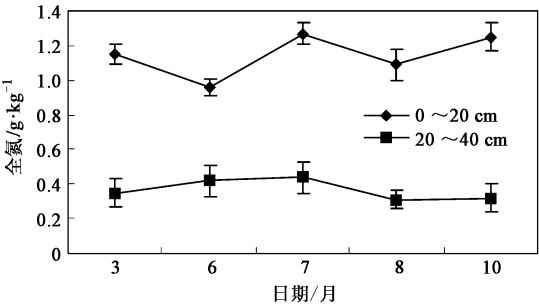


图 3 水文周期对草甸湿地土壤全氮的影响

Fig.3 Impacts of hydro-periods on soil total nitrogen in meadow wetland

2.3 水文周期对湖滨草甸土壤水解氮的影响

草甸湿地0~20 cm表层土壤水解氮在水文周期的作用下其波动幅度为130.98~222.19 mg/kg,其对水文周期变化的响应呈不规则的“M”型,与全氮的变化趋势相反(图3和图4). 20~40 cm深层土壤的波幅为24.58~47.41 mg/kg. 草甸土壤水解氮含量的2个高峰期分别出现在6月和8月,6月草甸表层和深层土壤水解氮的含量分别为159.87 g/kg和36.46 g/kg;8月草甸湿地水位下降后,土壤水解氮含量达到最高值,0~20 cm和20~40 cm土层分别为

222.19 mg/kg和47.41 mg/kg,比7月分别增加了46.6%和43.7%;10月草甸0~20 cm和20~40 cm土层水解氮含量分别为130.98 mg/kg和24.58 mg/kg,下降幅度分别为42%和48%,表明8月之后草甸湿地水位上涨对土壤水解氮的迁移损失具有显著作用.

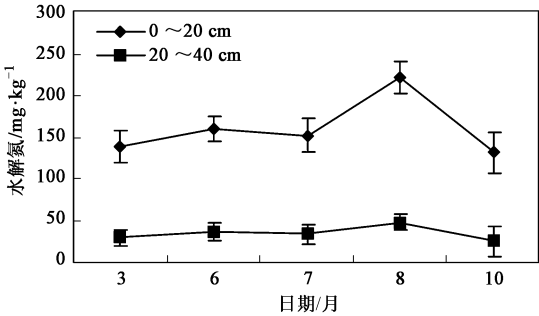


图 4 水文周期对草甸湿地土壤水解氮的影响

Fig.4 Impacts of hydro-periods on soil hydrolysable nitrogen in meadow wetland

3 讨论

3~6月间,草甸湿地地下水位较深,表层土壤含水量低,通气性良好,并且随着气温回升,土壤好气性微生物活性逐渐增强^[24],土壤有机氮矿化作用明显,有机氮矿化分解释放出无机氮导致6月土壤中水解氮含量增高;但是3~6月间正值草甸植物生长初期,植物对土壤中矿质氮的吸收利用将其迁出土壤系统^[25]是土壤中总氮营养水平下降的主要原因.

6月之后随着水位上升导致土壤全氮含量显著增加,主要因为草甸土壤过湿,土壤通气性变差,草甸植物群落中部分旱生植物在淹水环境胁迫作用下因根系缺氧而死亡^[4],补充了土壤中氮的含量.田昆^[26]研究发现纳帕海湖滨草甸土壤水分过湿状态下土壤水解酶活性减弱,0~20 cm土层脲酶、蔗糖酶和蛋白酶等水解性酶活性分别为31.59 mg/g、5.39 mL/g和0.86 mg/g,20~40 cm土层分别为4.17 mg/g、2.43 mL/g和0.51 mg/g,均处于整个水文周期的最低水平上,土壤水解酶活性的减弱降低了土壤有机氮的矿化分解转化为无机氮的能力;同时土壤中矿质氮随降水淋溶作用损失,导致草甸土壤水解氮含量较低.

土壤干湿交替有利于氮的转化^[28~30],土壤中无机态氮含量增加.8月草甸湿地地下水位下降后,0~20 cm表层土壤脲酶、蔗糖酶和蛋白酶等水解酶

酶活性分别增加了 26.31%、61.69% 和 96.24%^[26], 土壤有机氮矿化分解释放大无机氮, 土壤水解氮含量达到峰值, 分别比 7 月增加了 46.6% 和 43.7%; 土壤过氧化氢酶活性比 7 月份增加了 68.23%^[29], 表征土壤通气性增加, 土壤供氧充足, 硝化作用占绝对优势^[27], 而硝态氮在土壤溶液中的活性非常强^[4]. 湿地水位波动携带了大量土壤硝态氮, 这也是 8 月份土壤总氮营养水平下降的首要原因. 8 月之后, 草甸湿地水位再次回升, 有机氮的矿化过程受到抑制, 土壤无机氮的主要来源骤减, 并且水位上升加强了对土壤水解氮中硝态氮的携带作用, 10 月份 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤中水解氮分别比 8 月份降低了 41% 和 48%, 为整个水文周期内最低水平.

在植物生长季, 土壤有机氮矿化释放出无机氮是植物生长发育所必需的氮营养来源, 对于维持植物初级生产过程具有重要影响^[31], 因此在植物生长季, 适当低水位有利于植物生长发育. 8 月湿地水位下降, 草甸土壤水解氮含量大幅增加, 并且以硝态氮为主, 随湿地水位的再次上升(8 月后期), 土壤中的硝态氮将向水体中输送^[32], 而硝态氮被认为是造成水体富营养化的主要污染物^[18]. 近年来, 纳帕海湿地水体污染日趋严重, 雨季后期湖滨草甸水位波动影响下土壤环境无机态氮营养的释放是不可忽视的面源污染源, 而如果能适当控制 8 月后期湖水退落, 则可有效抑制土壤有机氮的矿化, 降低土壤无机氮向水体迁移量, 能够有效遏制湿地水体污染态势, 对于维护其中下游金沙江水质以及区域水生态安全有着重要影响. 因此采取工程措施控制雨季后期湿地水位波动, 而在气温逐渐转冷之后适当放水降低湿地水位, 能有效遏制草甸土壤氮矿化分解带来的水体氮负荷加剧水体污染的环境问题.

4 结论

(1) 在自然因素和人为因素的综合作用下纳帕海湖滨草甸湿地水位波动幅度大, 土壤干湿交替是草甸湿地水文周期变化的最显著特征.

(2) 水文周期对草甸湿地土壤全氮的赋存有显著影响. 水文周期是湿地土壤氧化还原状况的主要控制因素, 显著影响着土壤有机氮矿化分解, 制约着土壤氮的有效性. 水位波动加剧了土壤水解氮的迁移损失, 水文周期作用下的 0~20 cm 表层草甸土壤草甸水解氮和全氮的变化趋势呈显著的此消彼长态势.

(3) 雨季 8 月前后水位波动对于湖滨草甸土壤水解氮赋存与损失具有重要影响, 水位下降有利于有机氮矿化, 土壤水解氮含量增加, 随后水位上升加速了土壤水解氮向水体环境的迁移, 加剧了水体污染.

参考文献:

- [1] Misch W J, Gosselink J G. Wetlands[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000. 88-125.
- [2] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 79-91.
- [3] Martin J F, Reddy K R. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen process[J]. Ecological Modelling, 1997, 105(1): 1-21.
- [4] 陆健健, 何文珊, 童春富, 等. 湿地生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 77-98.
- [5] 张昆, 田昆, 莫剑锋, 等. 水文周期对纳帕海高原湿地草甸土壤碳素的影响[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 705-709.
- [6] 白军红, 王庆改, 丁秋, 等. 不同芦苇沼泽湿地土壤全氮季节动态变化和氮储量研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 162-165.
- [7] 白军红, 邓伟, 张玉霞, 等. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 77-81.
- [8] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型小叶章湿地土壤氮素净矿化与硝化作用[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1771-1777.
- [9] Sun Z G, Liu J S. Nitrogen cycling of atmosphere-plant-soil system in the typical *Calamagrostis angustifolia* wetland in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(8): 986-995.
- [10] Bai J H, Ouyang H, Deng W, et al. Spatial distribution characteristics of organic matter and total nitrogen of marsh soils in river marginal wetlands[J]. Geoderma, 2005, 124(1-2): 181-192.
- [11] McLaughlin J W, Gale M R, Jurgensen M F, et al. Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 129(1): 7-23.
- [12] Wilson D J, Jefferies R L. Nitrogen mineralization, plant growth and goose herbivory in an Arctic coastal ecosystem[J]. Journal of Ecology, 1996, 84(6): 841-851.
- [13] Committee on Characterization of Wetlands, National Research Council. Wetlands: Characteristics and Boundaries[M]. Washington DC: National Academy Press, 1995. 90-95.
- [14] Piehler M F, Twomey L J, Hall N S, et al. Impacts of inorganic nutrient enrichment on the phytoplankton community structure and function in Pamlico Sound, NC USA[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61(2): 197-209.
- [15] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenko J, et al. Human domination of Earth's ecosystem[J]. Science, 1997, 277: 494-499.
- [16] Stepanauskas R, Davidsson E T, Leonardson L, et al. Nitrogen Transformations in Wetland Soil Cores Measured by ¹⁵N Isotope Pairing and Dilution at Four Infiltration Rates[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, 62(7): 2345-2351.
- [17] Hutson J L, Cass A. A retentivity function for use in soil-water

- simulation models[J]. *European Journal of Soil Science*, 1987, **38** (1): 105-113.
- [18] Chang C, Entz T. Nitrate Leaching Losses Under Repeated Cattle Feedlot Manure Applications in Southern Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**: 145-153.
- [19] Gran li E, Wallström K, Larsson U, *et al.* Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea Area[J]. *AMBIO*, 1990, **19**: 142-151.
- [20] D'Elia C F, Sanders J G, Boynton W R, *et al.* Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: phytoplankton growth in large-scale, continuous cultures[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1986, **43**: 397-415.
- [21] 田昆,常凤来,陆梅,等. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(5): 681-686.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 62-78.
- [23] 殷勇,方念乔,王倩,等. 云南中甸纳帕海湖泊沉积物的磁化率及环境意义[J]. *地理科学*, 2000, **22**(4): 413-419.
- [24] 和文祥,朱铭莪,张一平,等. 陕西土壤脲酶热力学特征研究[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(6): 1043-1048.
- [25] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 192-198.
- [26] 田昆. 云南纳帕海高原湿地土壤退化过程及驱动机制[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2004. 66-82.
- [27] Reddy K R, Gaetz D A. The ecology and management of wetlands [M]. Oregon: Timber Press Portland, 1988.
- [28] Reddy K R, Patrick W H Jr. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition, and nitrogen loss in a flooded soil[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1975, **7**: 87-94.
- [29] Rajaramamohan V R, Rao J L N. Nitrogen fixation (C_2H_2 reduction) in soil samples from rhizosphere of rice grown under alternate flooded and nonflooded conditions[J]. *Plant and Soil*, 1984, **81**: 111-118.
- [30] Lowrence R R, Todd R L, Asmussen L E, *et al.* Waterborne nutrient budgets for the riparian zone of an agricultural watershed[J]. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 1983, **10**(4): 371-384.
- [31] 白军红,邓伟,王庆改,等. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(5): 599-603.
- [32] Chen R H, Twilley R R. Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark river estuary, Florida[J]. *Estuaries*, 1999, **22**(4): 955-970.