

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201704030

引文格式: 何文, 黄玉清, 廖建雄, 等. 桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤氮的季节变化 [J]. 广西植物, 2018, 38(1):24-35
HE W, HUANG YQ, LIAO JX, et al. Seasonal change of soil nitrogen content in reed vegetation of Huixian Karst Wetland, Guilin, China [J]. *Guihaia*, 2018, 38(1):24-35

桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤氮的季节变化

何文¹, 黄玉清¹, 廖建雄¹, 张德楠¹, 黄科朝¹, 周龙武¹, 张春来², 徐广平^{2*}

(1. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区广西植物研究所, 广西 桂林 541006; 2. 国土资源部/中国科学院 广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 该研究以桂林会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落土壤为对象, 研究了土壤氮含量的季节动态变化特征, 探讨了土壤氮对水热季节变化的响应趋势。结果表明: 土壤有机氮在全氮中所占比例较大, 0~10 cm 土层的全氮与 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的速效氮季节变化特征一致, 表现为夏季>秋季>春季>冬季; 10~20 cm 和 20~30 cm 土层的全氮和有机氮均表现为春季>夏季>秋季>冬季。0~10 cm 土层的有机氮和 10~20 cm 土层的速效氮变化趋势一致, 表现为秋季>夏季>春季>冬季。各层土壤硝态氮呈现出先升高后降低的单峰曲线变化趋势, 均表现为夏季>春季>秋季>冬季, 并与铵态氮 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的季节变化趋势相一致。20~30 cm 土层的铵态氮与 0~10 cm 和 20~30 cm 土层的土壤微生物量氮含量时间动态一致, 均表现为春季>秋季>夏季>冬季, 10~20 cm 土层的微生物量氮表现为秋季>春季>夏季>冬季的趋势。土壤铵态氮含量明显高于硝态氮, 各层土壤铵态氮含量基本呈现出不规则“M”形的双峰曲线变化。会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落不同土层土壤各形态氮含量的动态特征对水热变化的季节响应差异较大, 不同月份之间有所不同, 但均在冬季含量最低, 与月均气温和月均降雨量的变化关系表现为不完全的同步趋势。土壤氮含量季节变化特征的差异主要与气温、水分条件、不同生长期芦苇吸收利用、土壤有机碳、凋落物养分的归还以及有机氮矿化等影响有关。该研究结果为桂林会仙喀斯特国家湿地公园生态功能恢复与可持续发展利用提供了科学依据。

关键词: 喀斯特湿地, 土壤氮含量, 季节变化, 差异性

中图分类号: Q948.15, Q142.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2018)01-0024-12

收稿日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(41361057, 31360202); 广西科技攻关计划项目(桂科攻 14124004-3-5, 桂科重 1598014-3); 广西林业科技项目(桂林科字[2013]第 14 号); 岩溶动力学重点实验室基金(KDL2011-09); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金(16-380-32); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业 16005); 广西自然科学基金(2013GXNSFAA019081); 广西自治区主席科技资金项目(1324105) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41361057, 31360202); Science and Technology Program of Guangxi (14124004-3-5, 1598014-3); Guangxi Forestry Science and Technology Program ([2013]14); Karst Dynamics Laboratory, MLR and GZAR (KDL2011-09); Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain (16-380-32); Fundamental Research Fund of Guangxi Institute of Botany (16005); Natural Science Foundation of Guangxi (2013GXNSFAA019081); Chairman's Science and Technology Funds of Guangxi (1324105)]。

作者简介: 何文(1988-), 男, 广西富川人, 硕士, 主事从事生态环境等研究, (E-mail) hewen0320@126.com。

* **通信作者:** 徐广平, 博士, 副研究员, 主要从事生态学研究, (E-mail) xugpgau@163.com。

Seasonal change of soil nitrogen content in reed vegetation of Huixian Karst Wetland, Guilin, China

HE Wen¹, HUANG Yuqing¹, LIAO Jianxiong¹, ZHANG Denan¹, HUANG Kechao¹,
ZHOU Longwu¹, ZHANG Chunlai², XU Guangping^{2*}

(1. *Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China*; 2. *Karst Dynamics Laboratory, MLR and GZAR (Institute of Karst Geology, CAGS), Guilin 541004, Guangxi, China*)

Abstract: In order to investigate the dynamic variation characteristics of soil nitrogen content in soils of reed community in Huixian Karst Wetland, the different levels of soil samples (0–10 cm, 10–20 cm and 20–30 cm) were analyzed in laboratory. The results showed that organic nitrogen played a dominant role in the content of total nitrogen. The seasonal changes characteristics of total nitrogen in 0–10 cm soil layer were consistent with that of available nitrogen content in 0–20 cm soil layer, which had higher content in summer, followed by autumn and spring, with the lowest contents in winter. The order for seasonal variation of total nitrogen in 10–20 cm and 20–30 cm soil layers was spring, summer, autumn and winter, the same as organic nitrogen content. The trend for seasonal changes of organic nitrogen content in 0–10 cm soil layer was similar to available nitrogen in 10–20 cm soil layer, which showed that the content was higher in autumn, followed by summer and spring, with the lowest contents in winter. The variation of soil nitrate nitrogen showed a single peak curve during growing season, increased first and then decreased, which was the same to ammonium nitrogen content in 0–20 cm soil layer. The seasonal variation of ammonium nitrogen in 20–30 cm soil layer was consistent with microbial biomass nitrogen content in 0–20 cm soil layer, which showed that the contents were the highest in spring, lower in both autumn and summer, and the lowest in winter. The content of ammonium nitrogen was higher apparently than that of nitrate nitrogen, the changing trends of ammonium nitrogen in each soil layer appeared in an anomalous “M” shape. The seasonal difference of microbial biomass nitrogen in 10–20 cm soil was evident, and decreasing amplitude in season was autumn, spring, summer and winter in turn. The characteristics of various nitrogen forms in soils of reed community in Huixian Karst Wetland showed distinct differences with seasons, and the lowest in winter. Soil nitrogen content are important indicators for reflecting the status of soil nutrients and quality. In general, the contents and distributions of total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available nitrogen, organic nitrogen, microbial biomass nitrogen in soils of reed community in Huixian Karst Wetland were mainly influenced by multiple factors, such as plant absorption at different growth periods, soil organic carbon, the nutrient return of the plant litters, average monthly temperature, water conditions, soil organic nitrogen mineralization and so on. This study provides scientific reference for recovery of ecological functions and sustainable development and utilization of Huixian Karst Wetland Park.

Key words: karst wetland, soil nitrogen content, seasonal dynamic, difference

湿地是人类赖以生存与发展的资源宝库之一,具有重要的生态调节功能。湿地生态系统的物质循环研究,是湿地科学中重要的研究热点之一(胡冰等,2015)。其中,氮是制约湿地生态系统生产力的关键因子。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的功能(Martin &

Reddy,1997)。目前,关于土壤中氮含量的研究主要集中在土壤氮库盈亏及其去向(汪新颖等,2014;Lozano-García et al,2016)和土壤氮素的空间分布和时间变化(王玲玲等,2011;Lin et al,2016)以及提高土壤氮素利用效率等方面(高德才等,2014)。研究区域多为农田、森林和草地(Wilson

& Jefferies, 1996; Bai et al, 2005; Sun & Liu, 2007; 王玉红等, 2017)。湿地主要集中在滨海一带和内陆平原沼泽湿地等(孙志高等, 2010; 肖焯等, 2014)。但是缺乏对喀斯特湿地的研究报道。不同的湿地类型土壤养分的差异会较大(傅国斌和李克让, 2001)。由于喀斯特湿地形成的地质条件特殊, 下垫面组分不同, 加之人类活动的影响, 因此土壤氮含量可能会因环境水热的变化而存在差异。

广西桂林会仙喀斯特湿地是中国最大的岩溶湿地之一, 获有“桂林之肾”的美誉(陈克林, 1998)。近年来, 由于受到人类活动干扰的影响, 导致会仙湿地面积逐渐萎缩, 区域内建群种典型芦苇植物群落的面积也在不断地减少(吴协保, 2014)。这可能会影响到湿地土壤生态系统的养分含量变化。由于在不同湿地, 土壤结构以及植物根系分布状况不一, 不同层次土壤的氮素含量以及季节性变化过程可能会不同。本研究主要提出以下两个问题: (1) 典型芦苇植物群落土壤不同土层各形态氮含量的季节变化趋势是什么? (2) 土壤氮含量对水热变化(月均降雨量和月均气温)的季节响应是否表现有同步性? 该研究通过分析会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落土壤全氮、有机氮、硝态氮、铵态氮、速效氮、微生物量氮等含量的季节变化, 探讨与土壤水分、月均降雨量、月均气温和有机碳等影响因子的相关性, 以揭示会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落土壤氮含量季节变化特征及其影响因素, 为桂林会仙喀斯特国家湿地公园生态功能恢复与可持续发展利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于桂林市临桂县会仙镇, 东至雁山区, 西至四塘乡, 地理坐标为 $25^{\circ}01'30''$ — $25^{\circ}11'15''$ N, $110^{\circ}08'15''$ — $110^{\circ}18'00''$ E, 海拔 150~160 m, 总面积约 120 km², 是以草本沼泽和湖泊为主的喀斯特湿地, 是国内为数不多的中低海拔大型喀斯特湿地之一(吴应科等, 2006)。该

区属亚热带季风气候区, 年平均气温为 16.5~20.5 ℃, 极高温达 38.8 ℃, 极低温度为 -3.3 ℃, 年平均降雨量为 1 890.4 mm。降雨多集中在每年的 3—8 月, 形成了春夏雨多而集中, 秋冬少雨干旱的特点。土壤以红黄壤和红壤为主, 集中分布于洼地、平原和缓坡, 山区土壤层薄甚至基岩裸露(蔡德所和马祖陆, 2008)。湿地植被以挺水植被和沉水植被为主, 植物种类较多, 且生长茂盛, 盖度常可达 80%~95%, 主要建群种有芦苇(*Phragmites communis*)、华克拉莎(*Cladium chinense*)、五刺金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* var. *oryzelorum*)、石龙尾(*Limnophila sessiliflora*)等(韦峰, 2010)。研究区采样期间的月均气温与月均降雨量详见图 1。

1.2 方法

以会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落土壤为研究对象, 在野外详细踏查的基础上, 选择三块约 20 m × 20 m 的地块, 于 2014 年 3 月到 12 月, 每月中下旬采集一次土壤样品, 按照 S 型方法在各样地中选取 5 个代表性样点, 按表层(0~10 cm)、中层(10~20 cm)和下层(20~30 cm)三个层次用土壤取样器(直径 5 cm)分层取土, 同层土壤混匀为 1 个土样。先将采集的土壤样品, 装在无菌自封袋中, 迅速置于密封冰袋容器中冷藏后带回实验室于 4 ℃ 冰箱中保存; 然后备两份处理(1 份鲜样, 1 份风干样)。鲜样用于土壤硝态氮、铵态氮和微生物量氮指标的分析; 其余样品常规处理用于土壤理化性质的分析。

土壤含水量采用烘干法进行测定; 土壤有机碳(SOC)用总有机碳 TOC 仪测定(岛津 5000A, 日本); 全氮(TN)用 Vario ELIII 元素分析仪(德国); 速效氮(AN)用碱解扩散法(鲍士旦, 2000); 硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)用 2 mol · L⁻¹ 的 KCl 浸提后通过连续流动分析仪测定(SKALAR-SAN++8505, 荷兰); 有机氮(Org-N) = 全氮 - 无机氮(Inorg-N, 铵态氮 + 硝态氮); 土壤微生物量氮采用氯仿熏蒸浸提法测定(吴金水等, 2006)。

1.3 统计与分析

数据主要采用 SPSS 22.0 统计分析软件, 进行单因素方差分析和 Pearson 相关分析; 差异显著性检验同时采用 Bonferrini、Tukey、Scheffe 三种方法。

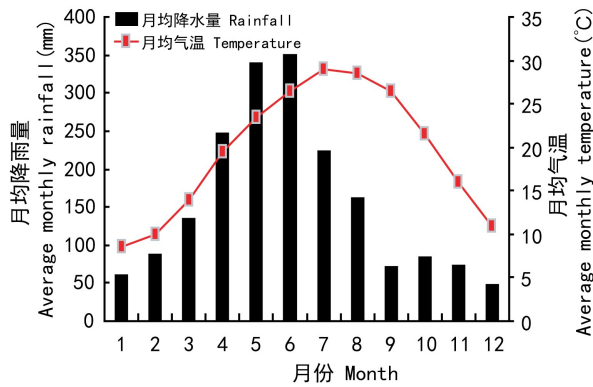


图 1 月平均气温与月平均降雨量的变化

Fig. 1 Changes of average monthly temperature and average monthly rainfall

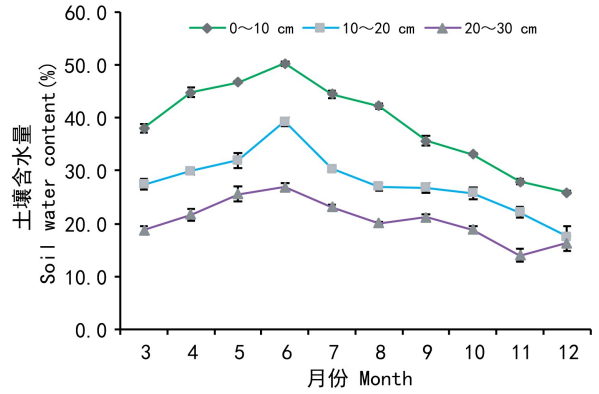


图 2 芦苇群落土壤含水量的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of soil water content in soils of reed community

图和表运用 Excel 2007 软件制作。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量的季节变化特征

从图 2 可以看出,会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤含水量的季节变化大体与月均降雨量趋势一致。土壤含水量在 3—6 月逐渐升高,6 月份达到最大值,随后呈减小趋势。月均降雨量的升高和下降的斜率分别为 7.4 和 -9.3,土壤含水量升高斜率为 3.8,降低斜率为 -4.1。相比较而言,皆低于月均降雨量的变化,含水量变化速率有所减缓。随着土壤深度的增加,土壤含水量减小,土壤含水量在垂直方向上具有极显著差异 ($P < 0.01$)。这可能因为在不同土层深度,土壤机械组成存在差异,引起土壤含水量的不同。表层土壤含水量均值为 38.90%,中层土壤含水量均值为 27.79%,中层比表层土壤含水量减少 11.11%,下层土壤含水量均值为 20.63%,下层比表层土壤含水量减小近 50%。

2.2 全氮含量的季节变化特征

3—4 月,气温逐渐升高,凋落物分解较慢,土壤全氮含量逐渐增加;4—6 月,中层和下层土壤氮素不能得到及时的补充,土壤氮元素含量有所下降,尤其是中层下降较为明显(图 3)。0~10 cm 土层,虽然土壤氮素被芦苇生长所吸收,但可能由

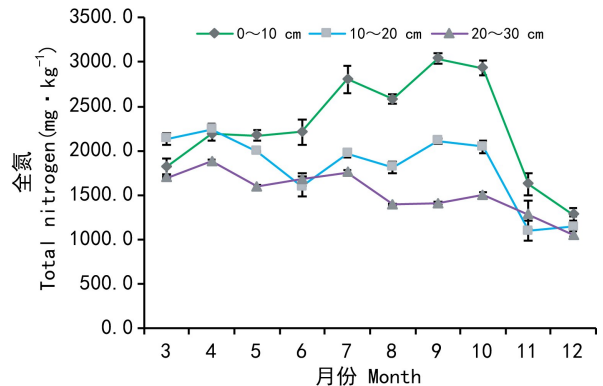


图 3 芦苇群落土壤全氮的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of total nitrogen content in soils of reed community

于氮的湿沉降输入和中下层土壤氮供给养分用于地上植株的生长,表层土壤表现出略有上升的趋势。6 月之后,伴随上一年残留凋落物的养分归还土壤,各土层的氮素均能得到较好的补充,逐渐增加。7—8 月,由于季节性淹水的影响,土壤有机质不易分解,而芦苇生长旺盛,对氮素的需求加大,出现 8 月土壤氮素含量减少至最低。这与月均降雨量在 7 月份较高、土壤含水量从 7—8 月逐渐减小相一致。8 月下旬芦苇生长逐渐缓慢,成熟后氮的需求量减少,使全氮含量有所增加,表层和中层在 9 月达到最大值,下层在 10 月达最大值。随后

土壤营养元素可能向地上植株转移,土壤全氮又降低至冬季的最低。土壤全氮含量的季节变化趋势大体表现如下:表层,夏季>秋季>春季>冬季;中层和下层,春季>夏季>秋季>冬季。

2.3 有机氮含量的季节变化特征

由图4可知,土壤有机氮的变化与全氮含量的变化基本一致,在会仙喀斯特湿地芦苇群落,土壤有机氮在全氮中所占比例较大。有机氮含量季节变化特征在月动态和土壤层次上都具有显著的差异性。0~10 cm 土层最大值出现在秋季(9月),达2 997.87 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;最小值出现在冬季(12月),仅为1 261.98 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,极差为1 735.89 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在土壤不同层次上,0~10 cm 土层与20~30 cm 土层间的土壤有机氮含量具有显著性差异($P < 0.05$)。表层土壤有机氮含量随时间变化出现先缓慢升高,7月后下降,8月后又继续升高,9月达到最大值,10月之后土壤有机氮含量急剧下降,12月达到最低值。10~20 cm 土层的土壤有机氮含量季节变化特征与表层相近,但也有不同,主要发生在4—6月,这一时期10~20 cm 土层的土壤有机氮含量呈下降趋势,与表层土壤表现正好相反;相对于另外两层,20~30 cm 土层的土壤有机氮含量季节变化特征不十分明显,远小于表层,3—12月,有升有降,波动范围不大,总体表现为下降趋势。总之,土壤有机氮含量的季节变化特征表现如下:表层,秋季>夏季>春季>冬季;中层和下层,春季>夏季>秋季>冬季。

2.4 硝态氮含量的季节变化特征

土壤硝态氮含量表现出明显的季节波动变化趋势(图5)。硝态氮在季节变化上表现为先升高后降低的趋势,表层和中层最高点分布在8月,下层最高点出现在7月,但最低月份均在12月。除了在3月、6月和11月,10~20 cm 土层高于0~10 cm 土层之外,整体上随着土壤深度的增加,土壤硝态氮逐渐减小。方差分析结果表明,会仙喀斯特湿地土壤硝态氮在0~10 cm 和20~30 cm 土层之间具有显著性差异($P < 0.05$);10~20 cm 土层与另外两层土壤硝态氮含量的季节变化有差异,但差异不显著。土壤硝态氮在0~10 cm 与10~20 cm 土层均值分别为4.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和3.81 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

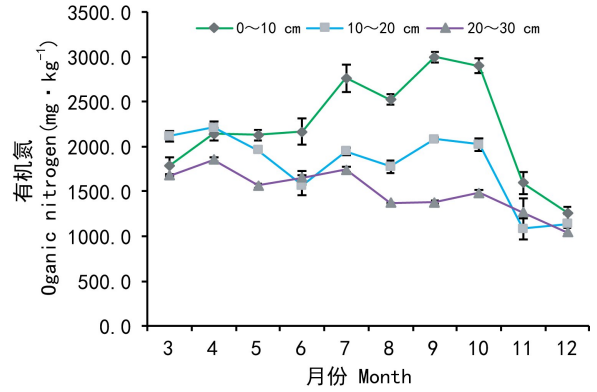


图4 芦苇群落土壤有机氮的季节变化
Fig. 4 Seasonal changes of organic nitrogen content in soils of reed community

kg^{-1} ,变异系数分别为0.42和0.40;而20~30 cm 的土壤硝态氮含量较低,均值为2.36 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数为0.51。不同层次土壤硝态氮含量的季节变化差异较小,总体上表现趋势为夏季>春季>秋季>冬季。

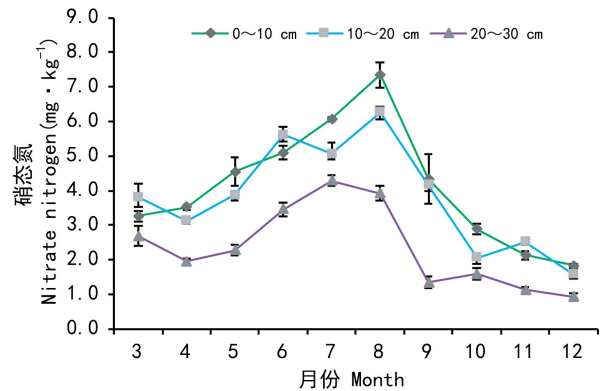


图5 芦苇群落土壤硝态氮的季节变化
Fig. 5 Seasonal changes of nitrate nitrogen content in soils of reed community

2.5 铵态氮含量的季节变化特征

铵态氮是植物生长所需的一种十分重要的无机态氮,是土壤肥力的一项重要指标。会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤铵态氮的平均水平为26.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (0~30 cm)(图6),表明土壤较肥沃。土壤铵态氮在不同土壤深度之间具有极显著差异

($P < 0.01$), 主要表现在表层与其他层次之间; 中层与下层之间差异不显著。表层的铵态氮含量要明显高于其他层次, 均值为 $35.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中层与下层的铵态氮含量均值为 $22.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相当于表层土壤铵态氮含量的 $2/3$ 。季节变化上, 3 个土壤层次的表现基本一致, 大体呈双峰形式, 类似不规则的“M”形。0~10 cm 土层峰值出现在 4 月和 8 月, 10~20 cm 土层峰值出现在 5 月和 8 月, 20~30 cm 土层峰值出现在 4 月和 9 月。7—8 月气温较高, 降水相对较多, 有利于有机氮的矿化分解, 从而使铵态氮在土壤中得以累积出现峰值。8 月下旬至 9 月中下旬芦苇处于种子成熟期, 还需不断地从土壤中汲取氮素, 使表层和中层土壤中的铵态氮迅速下降。不同的是下层土壤铵态氮增加, 其原因有待进一步研究。9 月后, 芦苇生长逐渐停滞, 对氮素的吸收量相对较少, 伴随气温下降和降雨量减小, 该时段内土壤铵态氮含量逐渐减小, 波谷均出现在冬季。不同层次土壤铵态氮含量的季节变化特征表现如下: 表层和中层, 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季; 下层, 春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季。

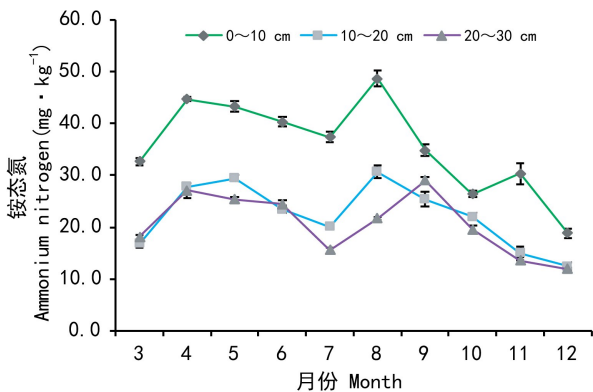


图 6 芦苇群落土壤铵态氮的季节变化
Fig. 6 Seasonal changes of ammonium nitrogen content in soils of reed community

2.6 速效氮含量的季节变化特征

如图 7 所示, 速效氮的季节变化特征与铵态氮有些相似, 也呈现为双峰形式, 尤其是 0~10 cm 土层表现较为明显, 但峰值出现在 7 月和 10 月, 波

谷出现在 8 月。垂直方向上, 0~10 cm 土层的土壤速效氮含量与另外两层土壤速效氮含量具有极显著差异 ($P < 0.01$), 0~10 cm 层土壤速效氮含量均值为 $155.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远大于 10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤的速效氮含量。会仙喀斯特湿地中, 铵态氮的含量较大, 0~30 cm 土层的铵态氮含量均值达到 $26.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此在季节变化上速效氮的变化特征与铵态氮的变化特征相近。由于易矿化的有机氮在速效氮中也占有较大比重, 因此速效氮的季节变化特征又表现出其自身的特点。在 3—6 月芦苇处于迅速生长的季节, 植物对速效氮的利用量相应增加, 表层土壤速效氮含量逐渐升高。这主要跟表层气温增高, 微生物相对活跃, 土壤硝化作用增强有关, 有助于土壤速效氮的积累, 表层和中层 7 月达第一个峰值。7—8 月急剧下降, 出现波谷, 这主要与植物吸收和氮素淋失等因素密切相关。9 月后芦苇种子开始成熟, 对氮素的需求下降, 土壤中速效氮含量开始略有富集。10~20 cm 土层在 3—6 月呈现先减小后增大再减小后增大的波动, 7—12 月份与表层土壤趋势一致; 20~30 cm 土层 3—6 月呈现先增大后减小再增大的波动, 第一个峰值出现在 6 月。除了 6 月和 7 月 20~30 cm 土层土壤速效氮高于 10~20 cm 土层外, 其他月份均表现为随土壤深度增加而减小。土壤速效氮含量的季节变化特征表现如下: 表层和下层, 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季; 中层, 秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季。

2.7 微生物量氮含量的季节变化特征

图 8 是微生物量氮含量的季节变化特征。在 0~10 cm 土层与 20~30 cm 土层之间, 会仙湿地土壤微生物量氮含量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 0~10 cm 层平均值为 $40.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大于 10~20 cm 层 ($30.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 远大于 20~30 cm 土层微生物量氮含量 ($19.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。土壤微生物量氮含量最高值出现在 5 月, 季节变化特征表现为波浪状, 3—5 月迅速上升, 5—6 月急剧下降, 形成波谷, 6—7 月有所上升, 8 月又重新下降, 随后又波动上升, 到 10 月之后由于气温降低, 微生物活性下降, 土壤微生物量氮迅速降低, 到 12 月达到最低值。3—5 月, 会仙湿地降雨逐渐增加, 气温升

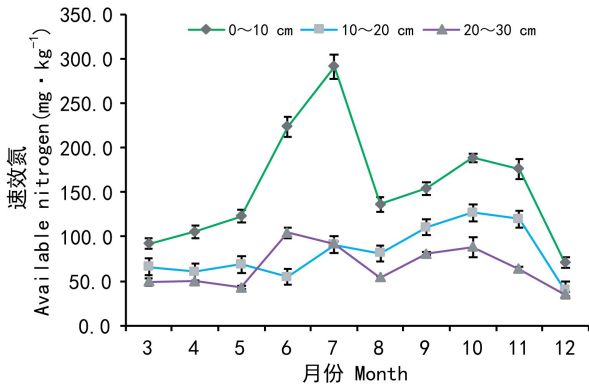


图7 芦苇群落土壤速效氮的季节变化
Fig. 7 Seasonal changes of available nitrogen content in soils of reed community

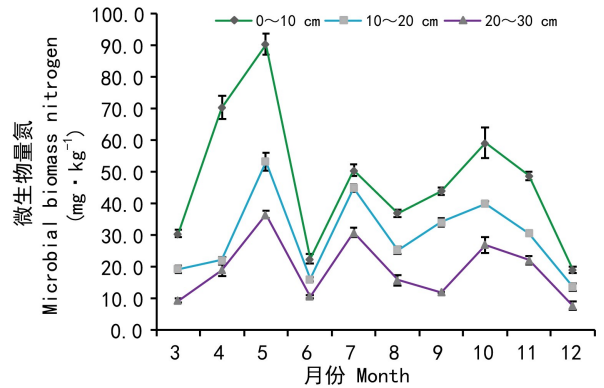


图8 芦苇群落土壤微生物量氮的季节变化
Fig. 8 Seasonal changes of microbial biomass nitrogen content in soils of reed community

高,适宜微生物活动,促使土壤微生物量氮迅速增加。初夏雨水暴涨,水位上升,6月表层土壤含水量超过50%,典型优势植物芦苇群落出现季节性淹水,造成一定程度上的缺氧,抑制了微生物的活性,可能导致6月土壤微生物氮含量较低。7月气温高,微生物活性得到释放,处于芦苇生长最为旺盛的时期,对氮素需求较大,从而土壤微生物量氮的含量虽有增加但不至于像春季那么明显。9月秋季芦苇成熟,凋落物增多,为微生物提供了大量营养库,土壤微生物量氮增加。总体上土壤微生物量氮含量的季节变化特征表现如下:表层和底层,春季>秋季>夏季>冬季;中层,秋季>春季>夏季>冬季。

2.8 碳氮比 (C/N) 的季节变化特征

芦苇群落土壤的 C/N (该研究中 $C/N = TC/TN$) 如图9所示,0~10 cm 土层的碳氮比为 7.51~16.34,10~20 cm 土层的碳氮比为 8.44~17.58,20~30 cm 土层的碳氮比为 6.62~12.91,0~30 cm 土层的月均值为 10.72。冬初土壤 C/N 显著高于其他月份,且不同土层间土壤 C/N 的季节变化规律有较大差异。3—6月,0~10 cm 与 20~30 cm 土层的土壤 C/N 先升后降;而 10~20 cm 土层的 C/N 呈上升趋势。7月,表层土壤 C/N 含量下降到最低值 7.51。与此同时,10~20 cm 土层的 C/N 较6月有所下降,维持在 10 左右;而 20~30

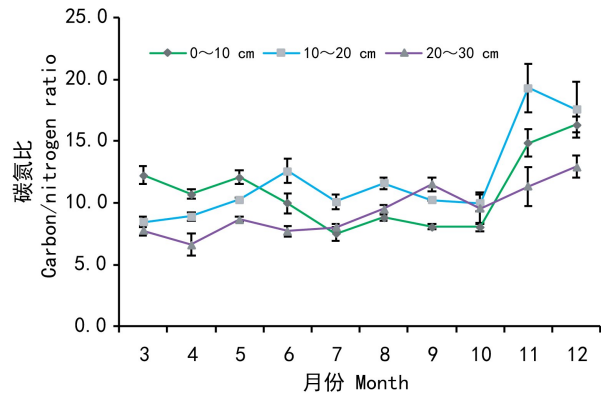


图9 芦苇群落土壤碳氮比的季节变化
Fig. 9 Seasonal changes of soil C/N ratio in soils of reed community

cm 土层却呈持续上升趋势。10月后,所有土层的土壤 C/N 迅速提高。总体上,土壤碳氮比的季节变化特征表现如下:表层,冬季>春季>秋季>夏季;中层和底层,冬季>秋季>夏季>春季。

2.9 土壤氮含量与含水量、有机碳、气温、降水量之间的相关性

会仙湿地土壤各形态氮含量与土壤含水量、气温、降水量具有一定的相关性,与土壤有机碳含量的相关性并不显著(表1)。就不同形态的氮而言,硝态氮与气温具有极显著的相关性 ($R^2 = 0.82$),与土壤含水量具有显著的相关性 ($R^2 = 0.71$)。

表 1 不同形态氮与土壤含水量、土壤有机碳、月均气温、月均降水量的相关性

Table 1 Correlations analysis on various nitrogen forms, soil water content, soil organic carbon, average monthly temperature and average monthly rainfall of reed community

指标 Index	硝态氮 NO ₃ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	速效氮 AN	有机氮 Org-N	全氮 TN	微生物量氮 MBN	碳氮比 C/N	含水量 SWC	有机碳 SOC	月均降水量 ARF	月均气温 AT
硝态氮 NO ₃ -N	1										
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.64 *	1									
速效氮 AN	0.35	0.04	1								
有机氮 Org-N	0.49	0.64 *	0.44	1							
全氮 TN	0.50	0.66 *	0.44	1.00 **	1						
微生物量氮 MBN	0.04	0.38	0.26	0.45	0.45	1					
碳氮比 C/N	-0.59	-0.67	-0.33	-0.95 **	-0.96 **	-0.34	1				
含水量 SWC	0.71 *	0.76 *	0.26	0.59	0.60	0.26	-0.71 *	1			
有机碳 SOC	-0.14	0.31	0.21	0.19	0.19	0.55	0.06	-0.08	1		
月均降水量 ARF	0.55	0.64 *	0.09	0.32	0.33	0.34	-0.47	0.93 **	-0.14	1	
月均气温 AT	0.82 **	0.70 *	0.63 *	0.69 *	0.69 *	0.33	-0.64 *	0.68 *	0.30	0.47	1

注：* 表示相关性在 0.05 水平上显著，** 表示相关性在 0.01 水平上显著。

Note: * represents $P < 0.05$, ** represents $P < 0.01$.

铵态氮与有机氮、全氮、含水量、气温以及降水都具有显著的相关性。速效氮、有机氮和全氮的表现一致，都与气温有显著的相关性，有机氮和全氮呈极显著相关性。微生物量氮与土壤有机碳具有一定的相关性，但不显著 ($R^2 = 0.55$)，碳氮比与土壤含水量和气温具有显著的负相关，相关系数分别为 0.71 和 0.64。由于无机态氮易于分解和流失，因此温度和水分是其主要的限制因素；而有机态氮则不同，微生物的分解对其影响很大。会仙湿地水分充足，温度是微生物活性的重要限制因素，因此月均气温与全氮含量表现了较大的相关性。

3 讨论与结论

3.1 土壤全氮和有机氮的变化

随着土壤深度的增加，会仙湿地土壤各种形

态氮含量总体上在减少，表层较高，有机氮和全氮的季节变化趋势基本一致，有机氮在全氮中所占比例较大，无机氮相对较少。这与万晓红等 (2008) 关于白洋淀湖泊湿地芦苇群落的研究结果一致。土壤全氮含量主要受制于土壤有机质含量的分布，由于每年有大量的植物凋落物经微生物分解后养分归还到土壤中，增加了表层土壤有机质含量，所以表层土壤全氮和有机氮含量也相应较高。土壤有机氮含量与植物的生长、枯枝落叶以及微生物活性等因素有关 (马万里等, 2010)。本研究中，会仙湿地春季 (3—5 月) 气温回升，植物枯枝落叶量略有增加，土壤的有机氮相对较少，6 月后，虽然气温逐渐升高和枯枝落叶分解速率加快，但此时正值芦苇生长旺盛时期，养分需求量也较大，加之这一时期，枯枝落叶的总量并不大，土壤有机氮含量的总体水平也并不是很高。到 8

月,气温较高,降水也相对较多,芦苇对无机氮的需求量很大,由此导致土壤有机氮的矿化作用增强,进而导致有机氮含量的下降。9—10月芦苇趋于成熟,芦苇对无机氮的需求量减小,土壤有机氮含量达到全年最高值。11月之后,气温转冷,微生物活性降低,土壤有机氮含量减少。

3.2 土壤无机氮的变化

会仙湿地芦苇群落土壤氮元素主要来自植物凋落物的分解,土壤铵态氮和硝态氮含量随着土层深度的增加而降低,铵态氮含量明显高于硝态氮含量。这是由于铵态氮易被土壤胶体和土壤颗粒吸附,不易发生迁移,且在淹水条件下,其不易发生硝化作用,而矿化氮中的硝态氮易在水流的作用下流失,所以土壤铵态氮含量明显高于硝态氮含量(夏志坚等,2015)。对于硝态氮和铵态氮这两种主要的无机态氮而言,会仙湿地芦苇群落土壤硝态氮的季节变化呈单峰形式,而铵态氮的季节变化呈双峰形式,差异明显($P < 0.05$)。

硝态氮是一种易溶易分解的矿质氮,且不被土壤所吸附,因此,土壤中硝态氮的含量除了受植被生长的影响外还受气温、水分条件、大气沉降、土壤结构、植物根系深度等因素的影响(白军红等,2002)。会仙湿地芦苇群落表层土壤含水量显著高于下层,同时芦苇土壤微生物在表层的活跃程度也超过下层(周龙武等,2017)。因此,表层土壤硝态氮含量显著高于下层,同时也与土壤中硝态氮的淋溶特性有一定关系。本研究在7月和8月会仙湿地月均气温较高,水分条件较好,有利于硝态氮的累积,这使土壤硝态氮含量峰值出现在8月和7月。会仙湿地硝态氮变化与白军红等(2005)在吉林省向海芦苇沼泽封闭性湿地不规则的倒“V”字型季节变化趋势接近;但与其不同的是,秋冬季后,植物因气温下降而生长缓慢,土壤硝态氮含量逐渐下降。这与袁可能(1983)所得结论“气温降低会导致土壤硝态氮含量减少”相一致。

铵态氮是一种有效态氮素,可被植物直接吸收利用,其含量变化显著影响着湿地土壤氮素的迁移转化过程。本研究中,3—5月,表层和中层土壤,随着气温逐渐回升,土壤微生物活动开始加强,土壤氮矿化速率增加,使土壤中累积的氮素释

放,土壤铵态氮逐渐增加。铵态氮在冬季出现了最低值,这可能主要是冬季气温低,水分较少引起的;而夏季出现波谷(7月),跟芦苇的生长有关,植物处于生长旺期需要从土壤中吸收大量的有效态氮以满足其生长需要,对铵态氮的需求较大。6—8月为一年中水热条件最为丰盛的时期,土壤的铵态氮在8月可能升高到最大;8月后,气温较高、有机氮矿化程度较强,芦苇趋于成熟期,而对铵态氮仍有需求量,土壤铵态氮逐渐减小。这一结果与孙志高等(2010)在黑龙江北部三江平原以及白军红等(2006a)在吉林省向海芦苇沼泽湿地的研究结果类似。0~10 cm层土壤铵态氮高于中下层,这不同于白军红等(2006a)的结论。这主要是因为喀斯特湿地土壤通常具有典型的富钙偏碱性地球化学背景,虽然中下层土壤的碱性条件可能会抑制微生物活性和铵离子的氧化,阻碍了硝化作用的发生,从而使铵态氮含量有所回升,但其增加的波动幅度仍小于0~10 cm层土壤。

3.3 土壤速效氮和微生物量氮的变化

速效氮是植物可直接吸收利用的各种氮的总和,主要包括无机态氮(铵态氮、硝态氮)及易水解的有机态氮(氨基酸、酰胺和易水解蛋白质),土壤不同土层速效氮含量的季节变化特征是铵态氮、硝态氮和易矿化有机氮含量变化相叠加的结果(孙志高等,2009)。速效氮主要分布在植物的根系区域,土壤速效氮含量的季节变化主要是受到植物根系吸收以及氮素分解和淋洗等制约(白军红,2006b)。本研究结果显示,速效氮季节变化特征具有铵态氮的变化特点,但由于速效氮中铵态氮的成分较大,同时其易矿化有机氮含量也占有一定比例,所以速效氮又与铵态氮的变化趋势并不完全一致。前期土壤中速效氮的积累与芦苇生长对其的吸收基本持平,虽略有上升趋势,但波动不大,后期根系吸收减少,土壤中速效氮含量不断富集。此外,芦苇在不同时期土壤中植物根系的吸收作用、水分条件、降水、有机氮矿化以及硝化-反硝化作用等对于速效氮含量的显著变化也存在重要影响。

土壤微生物量氮是土壤有机氮中最为活跃的部分,是土壤有机氮与无机态氮相互转化的关键环节。土壤微生物量氮含量的变化与气候特征、土壤

性质、植被类型以及水文状况有关(周建斌等, 2001)。Singh et al (1989) 在热带干旱区研究发现, 土壤微生物量氮含量与土壤水分有着重要的关系。本研究中, 会仙湿地芦苇群落土壤微生物量氮含量表现为随土层深度的增加而减少, 与土壤全氮和有机碳的变化趋势相似, 受会仙湿地季节性水位升降的影响, 季节变化趋势呈波浪状。主要是因为会仙湿地芦苇群落土壤表土层水热条件和通气状况较好, 植物根系分布较多, 凋落物周转较快, 有机质含量高, 能够为微生物进行自身合成与代谢过程提供足够的物质及能量来源。土壤微生物量氮呈现出与土壤全氮和有机碳有一定的相关性。这与肖焯等(2014)在三江平原的研究结果一致。

3.4 土壤碳氮比的变化

土壤碳氮比值的高低反映有机质在矿化过程中释放出有效氮的多少, C/N 与腐殖质分解速率成反比关系。土壤 C/N 的季节变化与湿地的水位情况、微生物活性、植物的吸收与归还、硝化与反硝化的速率等多种因素有关, 是多种因素综合作用的结果(牟晓杰等, 2013)。本研究中, 会仙湿地芦苇群落土壤 C/N 的季节变化特征表现为 3—10 月虽有升降, 但波动不大, 冬初 C/N 显著升高, 会仙湿地 C/N 平均值相对较低, 0~30 cm 土层的月均值为 10.72, 低于中国生态系统的 C/N 平均值 13(Tian et al, 2010)。这说明会仙湿地土壤有机质腐殖化程度较高, 有利于湿地土壤有机碳的积累, 有利于土壤微生物的分解和有机氮的矿化, 因此土壤速效氮含量也较高。会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落的土壤, 能有效地为植物提供氮, 使植物获得有效氮的供应, 对芦苇的生长比较有利。土壤的 C/N 也被用于辨别有机质的陆源性和海源性, 海水中水草由于富含蛋白质, 其 C/N 通常为 4~10, 而陆地植物由于富含纤维素而比值较高, 往往高于 20(Reddy & Diaz, 1995)。会仙湿地芦苇群落不同土层的 C/N 在不同时期均明显小于 20, 据此推测, 其土壤的有机质来源可能主要以海源性(河流湖泊水体)为主。

根据全国第二次土壤普查养分分级标准(全国土壤普查办公室, 1998), 会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤 0~10 cm 土层速效氮含量处于一级水

平, 较为丰富, 10~30 cm 土层速效氮含量维持在中等水平, 土壤 0~30 cm 土层全氮含量均值为 1 869.53 mg · kg⁻¹, 处于较丰富水平, 有利于需氮含量高的植物生长, 保护芦苇乡土植物群落有助于桂林会仙喀斯特国家湿地公园建设和生态系统功能的恢复。

综上所述, 不同土层的氮含量, 无论有机态还是无机态, 均表现为 0~10 cm 土层与 20~30 cm 土层之间具有显著性差异, 10~20 cm 土层处于中间过渡层次, 与其他层次间部分月份存在显著性差异。土壤有机氮在全氮中所占比例较大, 土壤铵态氮含量明显高于硝态氮含量, 各层土壤铵态氮含量基本呈不规则的“M”形的双峰曲线变化。

会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落不同土层土壤各形态氮含量的季节变化特征差异较大, 但冬季均较低。在 0~10 cm 土层, 全氮和速效氮季节变化趋势表现为夏季>秋季>春季>冬季; 有机氮表现为秋季>夏季>春季>冬季; 硝态氮和铵态氮表现为夏季>春季>秋季>冬季; 土壤微生物量氮表现为春季>秋季>夏季>冬季。在 10~20 cm 土层, 全氮和有机氮表现为春季>夏季>秋季>冬季; 硝态氮和铵态氮表现为夏季>春季>秋季>冬季; 速效氮表现为秋季>夏季>春季>冬季; 土壤微生物量氮表现为秋季>春季>夏季>冬季。在 20~30 cm 土层, 全氮和有机氮表现为春季>夏季>秋季>冬季; 硝态氮表现为夏季>春季>秋季>冬季; 铵态氮和土壤微生物量氮表现为春季>秋季>夏季>冬季; 速效氮表现为夏季>秋季>春季>冬季。

会仙喀斯特湿地不同形态氮的季节变化规律各异, 受多种因素的共同制约, 主要与气温、水分条件、不同生长期芦苇吸收利用、土壤有机碳、凋落物养分的归还以及有机氮矿化等影响有关。有关会仙喀斯特湿地土壤有机氮的矿化, 溶解有机氮(DON), 植物凋落物养分归还, 土壤硝化-反硝化作用等对湿地土壤氮素等生物地球化学循环的影响, 还需要进一步深入研究。

参考文献:

BAI JH, CUI BS, LI XW, et al, 2006a. Ammonium nitrogen con-

- centration seasonal dynamics in soils from reed wetlands in Xianghai [J]. *Acta Pratac Sin*, 15(1): 117-119. [白军红, 崔保山, 李晓文, 等, 2006a. 向海芦苇沼泽湿地土壤铵态氮含量的季节动态变化 [J]. *草业学报*, 15(1):117-119.]
- BAI JH, CUI BS, YANG ZF, et al, 2006b. Seasonal variation of alkaline hydrolysis N in marsh soils in Xianghai wetlands [J]. *Chin J Eco-Agric*, 14(1): 115-117. [白军红, 崔保山, 杨志峰, 等, 2006b. 向海沼泽湿地土壤碱解氮含量的季节变化特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 14(1):115-117.]
- BAI JH, DENG W, OUYANG H, et al, 2005. Seasonal dynamic variations in nitrate nitrogen in marsh soils from Phragmites wetlands in Xianghai National Natural Reserve [J]. *Syst Sci Com Stud Agric*, 21(2):85-87, 92. [白军红, 邓伟, 欧阳华, 等, 2005. 向海芦苇沼泽湿地土壤硝态氮含量的季节动态变化 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 21(2):85-87, 92.]
- BAI JH, DENG W, ZHU YM, et al, 2002. Study on the laws of spatial variation of nitrogen in soil of land/inland water ecotones—A case of LWE in Yueliangpao wetland [J]. *Acta Sci Circumst*, 22(3), 343-348. [白军红, 邓伟, 朱颜明, 2002. 水陆交错带土壤氮素空间分异规律研究—以月亮泡水陆交错带为例 [J]. *环境科学学报*, 22(3), 343-348.]
- BAI JH, OUYANG H, DENG W, et al, 2005. Spatial distribution characteristics of organic matter and total nitrogen of marsh soils in river marginal wetlands [J]. *Geoderma*, 124(1): 181-192.
- BAO SD, 2000. Soil agricultural chemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press; 14-112. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社; 14-112.]
- CAI DS, MA ZL, 2008. Main Ecological Problems in Lijiang River Watershed [J]. *J Guangxi Normal Univ(Nat Sci Ed)*, 26(1):110-111. [蔡德所, 马祖陆, 2008. 漓江流域的主要生态环境问题研究 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 26(1):110-111.]
- CHEN KL, 1998. The wetlands and waterfowl in China [J]. *Bull Biol*, 33(4): 2-4. [陈克林, 1998. 中国的湿地与水鸟 [J]. *生物学通报*, 33(4):2-4.]
- FU GB, LI KR, 2001. Progress in the study on the relationship between global warming and wetland ecological system [J]. *Geogr Res*, 20(1): 120-128. [傅国斌, 李克让, 2001. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展 [J]. *地理研究*, 20(1):120-128.]
- GAO DC, ZHANG L, LIU Q, et al, 2014. Application of bio-char in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 30(6): 54-61. [高德才, 张蕾, 刘强, 等, 2014. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率 [J]. *农业工程学报*, 30(6):54-61.]
- HU B, HAO S, ZHAO W, et al, 2015. A review on nitrogen cycle in wetland soils [J]. *Terr Nat Res Stud*, 5:67-71. [胡冰, 郝帅, 赵伟, 等, 2015. 湿地土壤氮素循环的研究进展 [J]. *国土与自然资源研究*, 5: 67-71.]
- LIN L, DAVIS L, COHEN S, et al, 2016. The influence of geomorphic unit spatial distribution on nitrogen retention and removal in a large river [J]. *Ecol Model*, 33(6):26-35.
- LOZANO-GARCÍA B, PARRAS-ALCÁNTARA L, BREVIK EC, 2016. Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas [J]. *Sci Total Environ*, 544: 963-970.
- MA WL, LI H, LÜ GF, et al, 2010. Seasonal variations of soil organic carbon and microbial biomass carbon in degraded desert steppes of inner Mongolia [J]. *Chin J Appl Ecol*, 21(2):312-316. [马万里, 李浩, 吕桂芬, 等, 2010. 内蒙古退化荒漠草原土壤有机碳和微生物生物量碳含量的季节变化 [J]. *应用生态学报*, 21(2):321-316.]
- MARTIN JF, REDDY KR, 1997. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen process [J]. *Ecol Modell*, 105(1):1-21.
- MOU XJ, SUN ZG, LIU XT, 2013. Seasonal change characteristics of soil nitrogen in different *Suaeda salsa* marsh in the Yellow River estuary [J]. *J Arid Land Res Environ*, 27(1): 114-119. [牟晓杰, 孙志高, 刘兴土, 2013. 黄河口翅碱蓬湿地土壤氮的季节变化 [J]. *干旱区资源与环境*, 27(1):114-119.]
- National Soil Survey Office, 1998. China's soil [M]. Beijing: China Agriculture Press; 356. [全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社; 356.]
- REDDY KR, DIAZ OA, 1995. Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake Okeechobee Basin [J]. *Ecol Eng*, 5(2-3):183-207.
- SINGH JS, RAGHUBANSHI AS, SINGH RS, et al, 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. *Nature*, 338(6215): 499-500.
- SUN ZG, LIU JS, 2007. Nitrogen cycling of atmosphere-plant-soil system in the typical *Calamagrostis angustifolia* wetland in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *J Environ Sci*, 19(8):986-995.
- SUN ZG, LIU JS, MOU X, 2010. Seasonal change characteristics of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in typical *Calamagrostis angustifolia* wetland soils of Sanjiang plain [J]. *Syst Sci Com Stud Agric*, 26(3): 277-282. [孙志高, 刘景双, 牟晓杰, 2010. 三江平原小叶章湿地土壤中硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 26(3):277-282.]
- SUN ZG, LIU JS, YU JB, 2009. Seasonal change characteristics of alkaline hydrolysis nitrogen and total nitrogen in typical *Calamagrostis angustifolia* wetland soils of Sanjiang plain [J]. *J Arid Land Res Environ*, 23(8):145-149. [孙志高, 刘景双, 于君宝, 2009. 三江平原小叶章湿地土壤中碱解氮和全氮含量的季节变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 23(8):145-149.]
- TIAN H, CHEN G, ZHANG C, et al, 2010. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of ob-

- servational data [J]. *Biogeochemistry*, 98(1-3): 139-151.
- WANG LL, SUN ZG, MOU XJ, et al, 2011. Spatial distribution of nitrogen in different wetlands' soils in intertidal flat of yellow river estuary [J]. *Chin J Soil Sci*, 42(6): 139-145. [王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等, 2011. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征 [J]. *土壤通报*, 42(6): 139-145.]
- WAN XH, ZHOU HD, LIU LH, et al, 2008. Research of nitrogen distribution in Baiyangdian wetland [J]. *J Soil Water Conserv*, 22(2): 166-169, 186. [万晓红, 周怀东, 刘玲花, 等, 2008. 白洋淀湖泊湿地中氮素分布的初步研究 [J]. *水土保持学报*, 22(2): 166-169, 186.]
- WANG XY, PENG YJ, WANG W, et al, 2014. Exploration of N fertilizer fate and quantitative soil nitrogen pool budget in growing season of summer maize in north China plain [J]. *Ecol Environ Sci*, 23(10): 1610-1615. [汪新颖, 彭亚静, 王玮, 等, 2014. 华北平原夏玉米季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量探索 [J]. *生态环境学报*, 23(10): 1610-1615.]
- WANG YH, MA TE, WEI YC, et al, 2017. Influence of grazing exclusion on soil organic carbon and nitrogen mineralization in semiarid grasslands of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 37(2): 378-386. [王玉红, 马天娥, 魏艳春, 等, 2017. 黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征 [J]. *生态学报*, 37(2): 378-386.]
- WEI F, 2010. Study on biodiversity and protection of karst wetland in Huixian [D]. Guilin: Guangxi Normal University: 11-21. [韦峰, 2010. 桂林会仙喀斯特湿地生物多样性及保护研究 [D]. 桂林: 广西师范大学: 11-21.]
- WILSON DJ, JEFFERIES RL, 1996. Nitrogen mineralization, plant growth and goose herbivory in an Arctic coastal ecosystem [J]. *J Ecol*, 84, 841-851.
- WU JS, LIN QM, HUANG QY, et al, 2006. The determination method of soil microbial biomass and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press. [吴金水, 林启美, 黄巧云, 等, 2006. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 中国气象出版社.]
- WU XB, 2014. Current status, conservation and restoration of karst wetland resources in Huixian of Guilin [J]. *Wetl Sci Manage*, 10(2): 20-22. [吴协保, 2014. 桂林会仙喀斯特湿地资源现状与保护恢复 [J]. *湿地科学与管理*, 10(2): 20-22.]
- WU YK, MO YF, ZOU SZ, 2006. Ecologic problem and protection method of karst wetland in Huixian, Guilin [J]. *Cars Sin*, 25(1): 85-88. [吴应科, 莫源富, 邹胜章, 2006. 桂林会仙岩溶湿地的生态问题及其保护对策 [J]. *中国岩溶*, 25(1): 85-88.]
- XIA ZJ, BAI JH, JIA J, et al, 2015. Vertical distributions of contents and storage of carbon and nitrogen in soils in phragmite australis salt marshes in the yellow river delta [J]. *Wetl Sci*, 13(6): 702-707. [夏志坚, 白军红, 贾佳, 等, 2015. 黄河三角洲芦苇盐沼土壤碳、氮含量和储量的垂直分布特征 [J]. *湿地科学*, 13(6): 702-707.]
- XIAO Y, HUANG ZG, WU HT, et al, 2014. Carbon and nitrogen distributions and microbial characteristics in the soils of four types of wetlands in Sanjiang plain, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 25(10): 2847-2854. [肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等, 2014. 三江平原 4 种典型湿地土壤碳氮分布差异和微生物特征 [J]. *应用生态学报*, 25(10): 2847-2854.]
- YUAN KN, 1983. Soil chemistry of plant nutrition elements [M]. Beijing: Science Press. [袁可能, 1983. 植物营养元素的土壤化学 [M]. 北京: 科学出版社.]
- ZHOU JB, CHEN ZJ, LI SX, 2001. Contents of soil microbial biomass nitrogen and its mineralized characteristics and relationships with nitrogen supplying ability of soils [J]. *Acta Ecol Sin*, 21(10): 1718-1725. [周建斌, 陈竹君, 李生秀, 2001. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用 [J]. *生态学报*, 21(10): 1718-1725.]
- ZHOU LW, HUANG YQ, WANG XG, et al, 2017. Dynamic changes of soil microbe quantity in reed vegetation of Huixian Karst Wetland, Guilin China [J]. *Guihaia*, 37(6): 685-693. [周龙武, 黄玉清, 王新桂, 等, 2017. 桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤微生物数量动态分析 [J]. *广西植物*, 37(6): 685-693.]