2021 年 第21卷 第35期
2021, 21(35): 14962-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:王 硕, 吴云杰, 张明意, 等. 贵州草海湿地不同植物群落表层土壤氮素的赋存特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14962-14968.
Wang Shuo, Wu Yunjie, Zhang Mingyi, et al. Characteristics of surface soil nitrogen occurrence of different plant communities in caohai wetland, guizhou[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14962-14968.

贵州草海湿地不同植物群落表层土壤氮素的赋存特征

王 硕[1], 吴云杰[1,2*], 张明意[1], 潘青春[1], 田 鑫[1], 苏春花[1]
(1. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州民族大学喀斯特湿地生态研究中心, 贵阳 550025)

摘 要 在湿地生态系统氮循环过程中,湿地土壤养分供给状况及可利用水平与氮素含量存在直接关系。以贵州草海湿地自然演替下植物群落表层土壤氮素含量作为研究对象,探讨4种典型湿地植物群落(牛筋草、李氏禾、香蓼和芦苇)土壤中硝态氮、铵态氮、速效氮和总氮含量以及不同土壤团聚体粒径下湿地土壤氮素的空间分布特征。结果表明:①各植物群落土壤阳离子交换量与总氮含量分布趋势基本一致,其中芦苇群落土壤中阳离子交换量、速效氮和总氮含量最高;②各植物群落不同粒径土壤团聚体速效氮和总氮含量均无显著差异($p>0.05$),芦苇群落土壤硝态氮含量在各粒径土壤团聚体中含量均低于其他植物群落,李氏禾群落土壤氨态氮含量在不同粒径土壤团聚体中存在显著差异($p<0.05$)。植物群落表层土壤氮素含量分布受植物种类及自身凋落物、降雨量和地势、微生物活动和有机质等因素的影响,土壤硝化作用受到抑制或促进,各植物群落铵态氮和硝态氮含量分布有显著差异($p<0.05$)。

关键词 湿地; 群落; 氮素; 团聚体; 阳离子交换量
中图法分类号 S153.6; **文献标志码** A

Characteristics of Surface Soil Nitrogen Occurrence of Different Plant Communities in Caohai Wetland, Guizhou

WANG Shuo[1], WU Yun-jie[1,2*], ZHANG Ming-yi[1], PAN Qing-chun[1], TIAN Xin[1], SU Chun-hua[1]
(1. School of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;
2. Research Center for Karst Wetland Ecology, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

[**Abstract**] In the process of nitrogen cycling in wetland ecosystem, there is a direct relationship between the supply and availability of wetland soil nutrients and nitrogen content. The nitrogen content which existing in the surface soil of the plant community under the natural succession of the Caohai Wetland in Guizhou Province was selected as the research object. The surface soil of four typical wetland plant communities (i.e. Goosegrass, Leesgrass, Elsholtzia and Phragmites) were collected, the content of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available nitrogen and total nitrogen in four kinds of phytocoenosium as well as the spatial distribution characteristics of wetland soil nitrogen under different soil aggregate particle sizes were studied. The results show these as follows. The distribution trend of soil cation exchange capacity and total nitrogen content in each plant community was basically the same. The contents of cation exchange capacity, available nitrogen and total nitrogen in the soil of Phragmites communis were the highest. The contents of available nitrogen and total nitrogen in soil aggregates with different particle sizes in each plant community had no significant difference ($p>0.05$). In the Phragmites community, the contents of nitrate nitrogen in the soil aggregates with different size were the lowest. In the Leesgrass community, the contents of ammonium nitrogen in the soil aggregates with different sizes were significantly different ($p<0.05$). The distribution of nitrogen contents in the surface of the plant community was affected by plant species and its own litter, rainfall and topography, microbial activities and organic matte et al. factors. As a result, soil nitrification was inhibited or promoted, and the final manifestation was that the distribution of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in each plant community was significantly different ($p<0.05$).

[**Keywords**] wetland; community; nitrogen; aggregates; cation exchange capacity

在湿地生态系统氮循环过程中,氮素含量高低直接影响湿地土壤的养分供给状况及可利用水平[1]。植物群落表层土壤是总碳、总氮等营养元素较为丰富的土层[2],但可被植物直接吸收利用的氮素不足土壤总氮的2%[3],95%以上氮素以不能直接被植物吸收利用的有机氮形式存在[4],需要经过

收稿日期: 2021-06-29; **修订日期**: 2021-08-26
基金项目: 国家自然科学基金(31860178);贵州省科技计划项目([2018]1075);贵州省大学生创新创业项目(2018520234)
第一作者: 王 硕(1996—),男,汉族,黑龙江绥化人,硕士研究生。研究方向:湿地生态修复。E-mail:1300857778@qq.com。
* **通信作者**: 吴云杰(1986—),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授。研究方向:湿地生态系统物质循环。E-mail:156715618@qq.com。

微生物的矿化作用将其转化为铵态氮和硝态氮形式的有效氮[5]。植物对不同形态氮素具有选择性吸收的特征,高原湿地生态系统中,植被对无机氮均能吸收,但由于氮素形态及时间空间分布特征的差异导致吸收效率有所不同[6],同时不同形态氮素对湿地生态系统碳循环过程有着重要作用,氮输入可能会影响其固碳潜势,进而减弱湿地生态系统的碳汇功能[7]。除此之外,不同形态氮素含量会对湿地土壤 pH[8]、土壤硝化和反硝化[9]、功能性微生物群落[1]及生物活性[10]产生影响。土壤阳离子交换量(cation exchange capacity,CEC)是体现土壤肥力的重要指标之一,能直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力[11],CEC 的空间分布具有自相关性,与土壤 pH、有机质、黏粒和电导率在不同滞后距离上存在不同的空间相互关系[12]。同时,张莹等[13]认为会仙岩溶湿地系统中 CEC 是土壤有机碳与总氮积累的控制因子之一,且土壤 CEC 与总氮呈极显著正相关[14]。吴统贵[15]在杭州湾滨海湿地植被群落演替研究中指出土壤含盐量是影响植被群落分布的主要环境因子之一,并发现 4 种盐基阳离子(K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+})对该区域植被群落分布丰富度指数、综合多样性指数均呈现逐渐降低的过程。湿地植被演替特征和土壤氮素循环的关系是生态学研究的重要领域之一,目前研究多为针对湿地水生植物多样性及群落演替[16]、运用土壤生态化学计量学对湿地不同演替阶段植物特征的研究[17],还包括典型高原喀斯特湿地植被土壤各碳氮含量空间分布特征[18-19]及微生物活性[20]的研究,不同土地利用方式对典型喀斯特地区土壤团聚体分布及团聚体碳氮含量的探究[21]等,但针对高原喀斯特地区自然演替条件下植物群落-土壤微环境氮素含量的分布特征及其原因的研究鲜有报道。

现以贵州高原湿地-草海湿地自然演替下湿地植物群落表层土壤作为研究对象,探讨 4 种典型湿地植物群落表层土壤氮素含量以及不同粒径土壤团聚体中湿地表层土壤氮素的空间分布特征。以助于揭示该区典型自然演替下湿地植被空间扩展过程中植被对氮素竞争的养分机制。同时由于湿地植物群落土壤电荷和营养元素分配与植物群落自然演替之间关系的研究报道较少,可望为研究草海湿地植物群落自然演替和反馈机制提供新的研究方向。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

贵州草海国家级自然保护区位于贵州省威宁县城西部(26°47′32″~26°52′52″N,104°10′16″~104°20′40″E),毗邻云贵高原乌蒙山,是长江水系金沙江支流横江洛泽河的源头湿地湖泊,也是一个完整、典型的高原喀斯特湿地生态系统[22]。草海国家级自然保护区总面积 9 600 km^2,属于贵州高原上最大的天然淡水湖泊,海拔约为 2 171.7 m,属于亚热带湿润季风气候,年均降雨量为 950 mm,其中 88% 集中在 5—10 月,无霜期 208.6 d,年日照时数约 1 805.4 h,挺水植物群落多为李氏禾、芦苇和水葱等群落[16],岸边多为一年生草本植物,以香蓼、牛筋草等为典型。作为中国典型高原喀斯特地区湿地生态系统,草海自然保护区以其独特的生态性质、地理位置与人文景观具有突出的代表意义[23]。

1.2　供试材料

2018 年 8 月,沿草海湿地设置 12 个采样点,分别选择牛筋草(NJC)、李氏禾(LSH)、香蓼(XR)和芦苇(LW)4 种典型植物群落各 3 处,具体如图 1 所示,每个采样点设置一个 10 m×10 m 植物群落样方,每个样方内用五点法取深度 0~20 cm 土壤,随后将所取土样放入密封袋并混合均匀,低温保存备用,用来测定氮素指标。采集样品经过湿筛法获得 4 种粒径团聚体粒径,标记后放在阴凉干燥处储存备用。

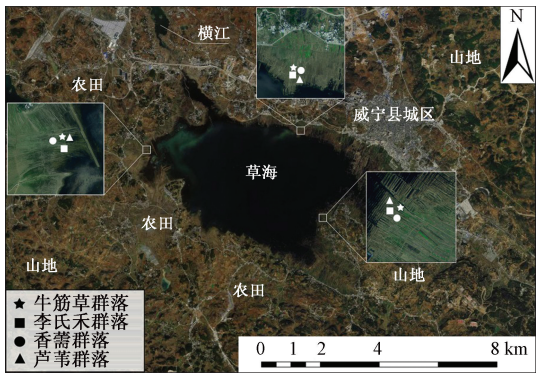


图 1　草海湿地取样点示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sampling points in Caohai Wetland

1.3　研究方法

研究采用氯化钡缓冲液法测定土壤 CEC[24]。硝态氮测定方法为紫外分光光度法;铵态氮测定方法为 2 mol/L 氯化钾-靛酚蓝比色法;速效氮测定方法为碱解扩散法;总氮测定方法为半微量开式法,上述实验均重复 3 次,具体操作方法参见《土壤农业化学分析方法》[25]。

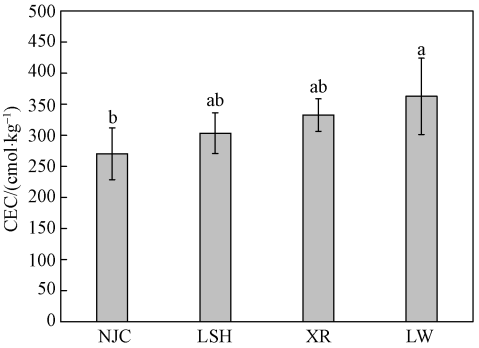
1.4　数据处理

研究采用了数理分析方法,选用 Excel 2010 记录试验数据、Origin9.0 制图,运用 SPSS 20.0 分析各态氮素与土壤 CEC 的差异显著性和相关性。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落湿地土壤 CEC 的分布特征

土壤 CEC 指土壤溶液在酸碱度恒定时,单位质量干土所吸收的全部交换性阳离子的物质的量[11]。土壤交换性阳离子的吸附与解吸作用以及养分的固持与淋失作用是影响土壤肥力的主要因素[26]。图 2 所示为本研究中不同植物群落湿地土壤 CEC 的分布特征,4 种植物群落土壤中 CEC 芦苇群落含量最高为(362.96 ± 61.48) mg/kg(Mean ± SD,下同),牛筋草群落含量最低为(270.33 ± 41.63) mg/kg,其他两种群落含量分别为(303.43 ± 32.87) mg/kg 和(332.68 ± 26.18) mg/kg。忽略 4 种植物群落生境的细微差别,牛筋草群落与芦苇群落土壤 CEC 差异性显著($p < 0.05$),而二者与李氏禾、香需群落无差异。



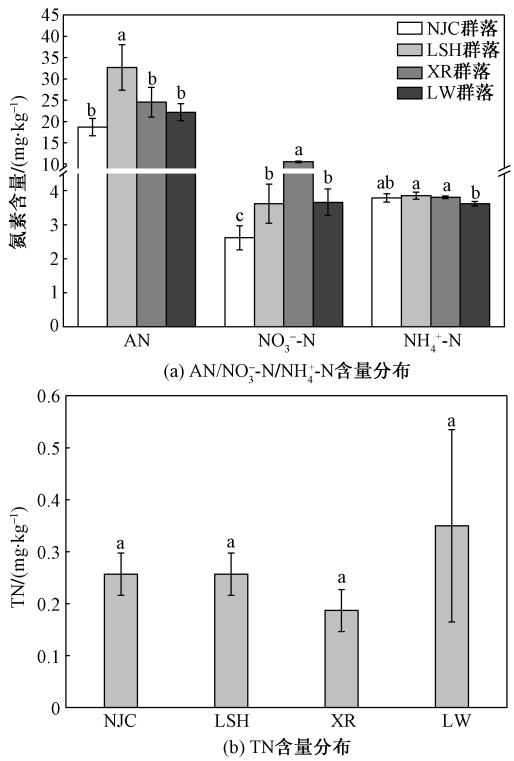
不同字母表示植物群落之间土壤 CEC 含量的差异性

图 2 4 种湿地植物群落土壤中 CEC 的含量分布

Fig. 2 The distribution of cation exchange capacity in soil of four wetland plant communities

2.2 不同植物群落湿地土壤各态氮的分布特征

图 3 所示为不同植物群落湿地土壤各态氮的分布特征,李氏禾群落下土壤速效氮(available nitrogen,AN)含量差异显著($p < 0.05$),且李氏禾群落下土壤速效氮含量为 4 种植物群落最高,达到了(32.67 ± 5.35) mg/kg,而牛筋草群落土壤速效氮含量最低,为(18.67 ± 2.02) mg/kg;铵态氮和硝态氮作为速效氮中两种重要的无机氮,二者含量在不同植物群落下各不相同,香需群落土壤硝态氮含量较其他 3 种植物群落较高,达到了(10.52 ± 0.18) mg/kg,4 种植物群落土壤硝态氮含量差异极显著($p < 0.01$);在 4 种植物群落土壤中铵态氮含量分布范围为 3.55 ~ 3.93 mg/kg,较硝态氮含量相比,各植物群落土壤铵态氮含量差异较小($p > 0.05$)。总氮(total nitrogen,TN)含量在不同植物群落土壤中在数值上差异较大,但总氮含量与不同植物群落差异性并不显著($p > 0.05$),其中芦苇植物群落土壤中总氮含量最高,达到了(350.00 ± 185.20) mg/kg,香需群落土壤总氮含量最低,为(186.67 ± 41.41) mg/kg。



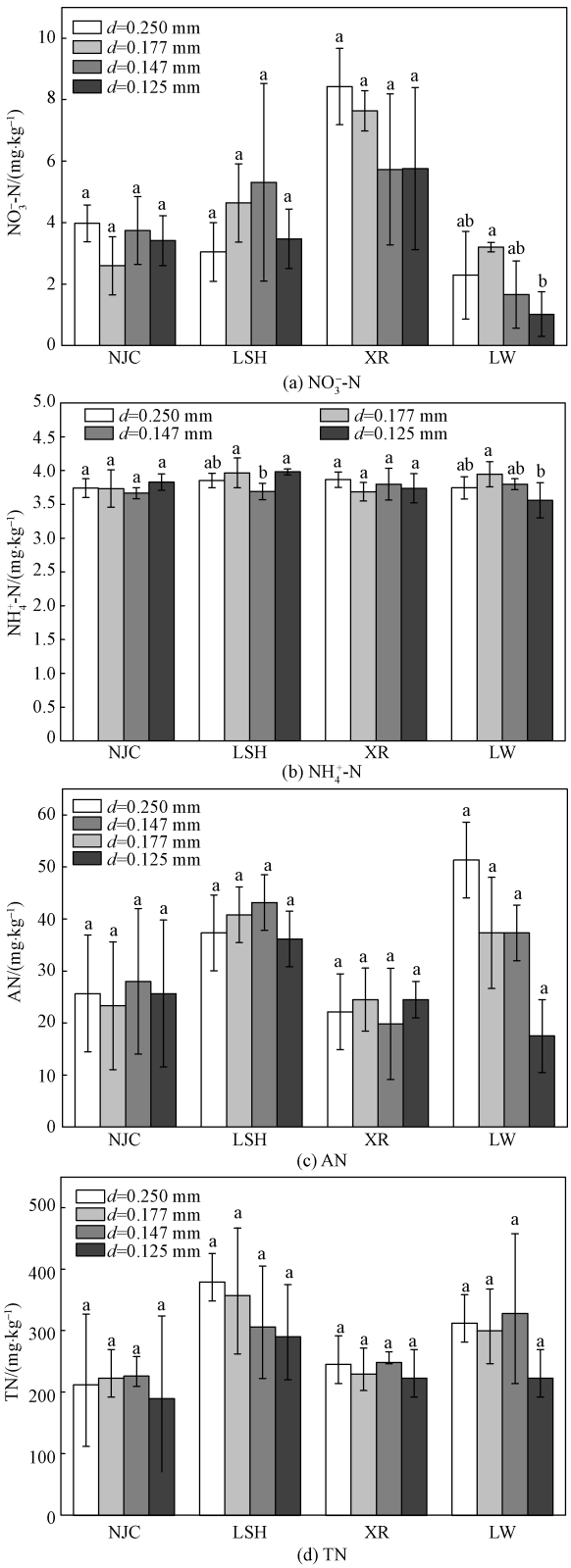
不同字母表示植物群落之间土壤各态氮含量的差异性

图 3 4 种湿地植物群落土壤中 AN、NO_3^--N、NH_4^+-N 及 TN 各态氮含量分布

Fig. 3 The distribution of nitrogen (NO_3^--N、NH_4^+-N and TN) in the soil of four wetland plant communities

2.3 不同植物群落湿地土壤各态氮与土壤团聚体粒径的关系

4 种湿地植物群落(NJC、LSH、XR、LW)土壤中硝态氮、铵态氮、速效氮及总氮在不同土壤团聚体粒径(d = 0.250、0.177、0.147、0.125 mm)的含量分布,如图 4 所示。牛筋草群落与香需群落,各态氮素在不同粒径土壤团聚体中含量差异均不明显($p > 0.05$),香需群落中各粒径土壤团聚体中硝态氮含量整体分布与其他 3 种植物群落相比均较高,当土壤团聚体粒径为 0.25 mm 时,硝态氮含量最高达(8.43 ± 1.24) mg/kg,当土壤团聚体粒径 $d \leqslant$ 0.147 mm时,硝态氮含量分布趋于稳定;李氏禾群落不同粒径土壤团聚体中硝态氮、速效氮和总氮含量不具有显著差异($p > 0.05$),硝态氮与速效氮含量分布基本趋势一致,速效氮与总氮与其他 3 种植物群落相比整体含量较高;铵态氮在不同粒径土壤团聚体中含量均较为稳定,均未超过 4.0 mg/kg,其中在土壤团聚体粒径 $d \geqslant$ 0.177 mm 时,铵态氮含量



不同字母表示植物群落内不同粒径土壤团聚体各态氮含量的差异性

图 4　4 种湿地植物群落土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N、AN 及 TN 在不同粒径土壤团聚体中含量分布

Fig. 4　The distribution of nitrogen (NO_3^--N, NH_4^+-N, AN and TN) in soil aggregates with different particle sizes of four wetland plant communities

具有显著差异($p<0.05$)。芦苇群落不同粒径土壤团聚体中速效氮与总氮含量分布不具有显著差异($p>0.05$),硝态氮含量分布整体较其他 3 种植物群落相比含量最低,当土壤团聚体粒径为 0.177 mm 时,硝态氮含量与土壤团聚体粒径为 0.125 mm 时具有显著差异($p<0.05$),与铵态氮分布差异显著性一致。

3　讨论

3.1　不同植物群落对湿地土壤各态氮含量的影响

各群落下土壤总氮平均含量分布趋势为 $TN_{LW}>TN_{NJC}\approx TN_{LSH}>TN_{XR}$,这与张珍明等[27]研究草海沼泽草地总氮含量基本一致。不同植物群落下土壤总氮含量差异反映了植物群落的固氮能力和初级生产力差异,白红军等[3]研究认为,湿地植物种类及其自身对元素的选择性吸收、滞留作用会使土壤中不同元素含量形成较大差异。8 月草海气温升高,伴随着雨水频次及降雨量增加,芦苇群落处于快速生长期,其光合作用和蒸腾作用均强于其他植物群落,物质循环加快,植物根系大量吸收无机态氮,因此芦苇群落土壤中铵态氮和硝态氮与其他群落差异显著;同时凌敏等[28]研究表明在黄河三角洲湿地植物群落地势对土壤氮的累积有决定性影响,芦苇根部沉水,抑制硝化作用且硝态氮易淋失;芦苇为高大草本植物,大量的植物凋落物及残体经微生物分解后,增加了表层土壤有机质含量[29],同时淹水造成湿地土壤有机碳矿化速率减缓,降低了微生物参与的氮循环速率,综合以上两方面原因,造成芦苇群落土壤中硝态氮和铵态氮含量与其他植物群落有显著差异,且总氮的含量较高[13]。李氏禾群落速效氮较高,由于李氏禾为矮小草本植物,生长在岸边浅水滩涂,合适的温度、水文及溶解氧条件使得土壤中促进微生物参与的氮循环,从而速效氮中其他氮含量较高。土壤腐殖质是土壤保持较高 CEC 的一个重要影响因子[26],这也解释了芦苇群落表层土壤 CEC 和总氮含量较高的原因[30]。

4 种植物群落对土壤中铵态氮含量分布差异显著,牛筋草群落硝态氮含量低于铵态氮含量,可能是 8 月植物处于生长旺盛期[31],会大量吸收土壤中硝态氮;另一方面,牛筋草群落土壤中 CEC 最低,反映了土壤 中有机质含量低,亚硝化或硝化细菌没有充足的碳源用于生命活动,同时 8 月草海湿地雨水频次及降雨量增加,导致牛筋草群落表层土壤含水量增加,土壤中好氧微生物耗氧速率大于水体复氧速率,对微生物活动特别是硝化作用产生抑制作

用,这与王大鹏等[32]研究水分对土壤硝化作用影响的结果一致;同时铵态氮易被土壤胶体吸附,而硝态氮易淋失[33],最终表现为牛筋草群落铵态氮含量略高于硝态氮含量,同时也是速效氮含量低于其他植物群落的主要原因。由于香蒲群落自身植物特性,生长地势均高于其他植物群落,丰水期土壤含水率不会发生剧烈波动,王大鹏等[32]认为土壤水分含量为60%持水量时,硝化速率及硝化率最高,良好的水文、温度条件和充足有机质含量利于土壤硝化细菌等微生物活动,促进土壤中硝化作用使铵态氮向硝态氮转化;有研究表明,当湿地土壤可利用性铵态氮无法满足微生物固持需求时,微生物对硝态氮有较高固持量[34];此外植物生长还需吸收无机氮,综合几种因素使得香蒲群落硝态氮含量高于铵态氮含量。

3.2 不同植物群落对湿地土壤团聚体氮素含量的影响

土壤团聚体作为土壤结构最基本的单元,通过多重物理化学机制对团聚体中有机碳氮进行有效固持和保护[35]。学者一般以0.25 mm为界对土壤团聚体进行分组,将团聚体分为大团聚体和微团聚体两类[36-37],有研究表明喀斯特地区土壤团聚体主要以大团聚体(>0.5 mm)为主,总量超过80%,在喀斯特地区以封育为土地利用方式下,团聚体粒径为0.054~0.25 mm时,土壤团聚体有机质含量处于较低水平[21],而有机质作为团聚体形成的重要胶结物,微团聚体提供良好的吸附表面[38],起到吸附土壤中各类营养物质的作用。

在不同植物群落下各粒径土壤团聚体中铵态氮含量基本呈现无差别分布的特征,这可能由于土壤团聚体粒径位于0.25~0.125 mm时,土壤中有机质的含量较低,无法对铵态氮起到吸附作用或吸附作用力较小。土壤有机碳、硝态氮含量和微生物生物量氮是影响土壤硝化与反硝化潜势的关键共性因子[9],在不同粒径土壤团聚体中,有机质含量随着土壤团聚体粒径变小而降低[21],抑制土壤中铵态氮向硝态氮转化过程。当土壤团聚体粒径为0.125 mm时,不同植物群落下硝态氮含量均表现为比其他粒径团聚体低,这可能受到土壤团聚体中有机质含量的影响。当香蒲群落土壤团聚体粒径为0.147 mm时,土壤硝化作用已明显受到影响。

而两种草海湿地典型挺水植物群落——李氏禾与芦苇群落,在不同粒径团聚体中硝态氮含量与香蒲群落相比,分布趋势并不一致。8月草海湿地迎来夏季丰水期,李氏禾与芦苇群落淹水较深,抑制土壤中硝化作用,同时植物生长旺盛期对硝态氮吸收作用较为强烈,淹水还对硝态氮有淋失作用,同时还包括植物光合作用及蒸腾作用加快物质循环;硝化作用还受有机碳的数量和质量影响[39],特别是芦苇群落有机质含量高,抑制芦苇群落土壤硝化作用,以上几种因素共同发挥作用,李氏禾群落最终表现为在粒径为0.147 mm土壤团聚体、芦苇群落在0.177 mm土壤团聚体中硝态氮含量较高,但整体水平较低;芦苇群落硝态氮含量整体水平最低。

各植物群落在不同粒径土壤团聚体中总氮和速效氮含量差异性不显著,在芦苇和李氏禾群落不同粒径土壤团聚体中总氮和速效氮含量基本均高于其他植物群落,这也进一步说明了淹水削减土壤有机碳矿化速率从而影响了土壤氮循环;芦苇群落土壤CEC高,总氮含量分布高,牛筋草群落正相反,与陈忠柳等[40]研究结果一致,总氮含量与土壤有机质和CEC含量呈正相关,土壤阳离子交换作用变化(45%)主要受土壤基本理化因素影响。此外草海湿地周围特别是北岸人为活动较为强烈[29],李氏禾群落和芦苇群落为挺水植物,土壤易受到水体中氮素的影响[39],同时有机态氮占总氮的95%以上[4],因此不同植物群落下总氮整体含量差异较为明显。

4 结论

(1)8月植物处于生长旺盛期,同时草海处于丰水期,植物群落表层各氮素含量分布受植物种类及自身凋落物、降雨量和地势、微生物活动、有机质和生长期等因素的影响,土壤硝化作用受到抑制或促进,最终表现为各植物群落铵态氮和硝态氮含量分布有显著差异。

(2)湿地表层土壤氮素含量受水体中外部氮输入及氮素本身在自然土壤中分布结构的影响,因此各植物群落氮素含量表现并不一致,特别是土壤中总氮含量。同时本研究可为后续进一步为草海地区氮输入及其对该地区碳汇和碳储量研究提供基本数据支撑。

参 考 文 献

[1] Lee S H, Megonigal P J, Kang H. How doelevated CO_2 and nitrogen addition affect functional microbial community involved in greenhouse gas flux in salt marsh system[J]. Microbial Ecology, 2017, 74(3): 670-680.

[2] 梁 坤, 樊玉清, Kudakwashe Meki, 等. 黄河口湿地典型盐碱植被群落土壤氮素的季节动态及根际效应[J]. 环境化学, 2019, 38(10): 2327-2335.
Liang Kun, Fan Yuqing, Kudakwashe Meki, et al. The seasonal dynamics of nitrogen and rhizosphere effects in the typical saline-alkali vegetation communities of the Yellow River Estuary Wetland

[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(10): 2327-2335.

[3] 白红军, 王庆改, 丁秋祎, 等. 不同芦苇沼泽湿地土壤总氮季节动态变化和氮储量研究(简报)[J]. 草业学报, 2008(2): 162-165.
Bai Hongjun, Wang Qinggai, Ding Qiuyi, et al. Nitrogen stocks and seasonal variations of total nitrogen in phragmites communis soils from different wetlands[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008(2): 162-165.

[4] Guo X, Lu X, Tong S, et al. Influence of environment and substrate quality on the decomposition of wetland plant root in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008(12): 1445-1452.

[5] Man L, Cai Z C, Mary B, et al. Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils[J]. Plant & Soil, 2010, 334(S1-2): 377-389.

[6] Gao J Q, Mo Y, Xu X L, et al. Spatiotemporal variations affect uptake of inorganic and organic nitrogen by dominant plant species in an alpine wetland[J]. Plant & Soil, 2014, 381(1-2): 271-278.

[7] 陶宝先, 陈永金. 不同形态氮输入对湿地生态系统碳循环影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 162-167.
Tao Baoxian, Chen Yongjin. Effects of nitrogen forms on the stability of soil organic carbon in wetlands[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 162-167.

[8] Guo P, Wang C, Jia Y, et al. Responses of soil microbial biomass and enzymatic activities to fertilizations of mixed inorganic and organic nitrogen at a subtropical forest in East China[J]. Plant and Soil, 2011, 338(S1-2): 355-366.

[9] 张青山, 欧阳运东, 肖孔操, 等. 喀斯特峰丛洼地植被恢复对土壤硝化与反硝化潜势的影响[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(3): 520-526.
Zhang Qingshan, Ouyang Yundong, Xiao Kongcao, et al. Variations in nitrification and denitrification potential following vegetation restoration in a Karst peak cluster and depression, southwest China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(3): 520-526.

[10] 王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等. 黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响[J]. 生态学报, 2010(24): 7092-7100.
Wang Chunyang, Zhou Jianbin, Dong Yanjie, et al. Effects of plant residues and nitrogen forms on microbial biomass and mineral nitrogen of soil in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010(24): 7092-7100.

[11] 李锦芬, 瞿明凯, 黄　标, 等. 区域土壤 CEC 与相关控制因子的空间非平稳关系评估[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 638-646.
Li Jinfen, Qu Mingkai, Huang Biao, et al. Spatially non-stationary relationships between cation exchange capacity and related control factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 638-646.

[12] 包维斌, 白一茹, 杨　帆, 等. 宁夏中宁枸杞林地粉壤土阳离子交换量空间分布预测方法对比[J]. 生态学杂志, 2020, 321(4): 1377-1386.
Bao Weibin, Bai Yiru, Yang Fan, et al. Predicting spatial distribution of cation exchange capacity in silt loam soil under Lycium barbarum of Zhongning, Ningxia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 321(4): 1377-1386.

[13] 张　莹, 刘　畅, 宋　昂, 等. 基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 11-18.
Zhang Ying, Liu Chang, Song Ang, et al. Relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities in Huixian karst wetland system based on canonical correspondence analysis[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(1): 11-18.

[14] 孔令阳, 殷书柏, 刘吉平, 等. 三江平原碟形洼地-岛状林土壤阳离子交换量分布特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8828-8833.
Kong Lingyang, Yin Shubai, Liu Jiping, et al. Distribution characteristics of soil cation exchange capacity of saucer-shaped depressions to island forests in the Sanjiang Plain[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 8828-8833.

[15] 吴统贵. 杭州湾滨海湿地植被群落演替及优势物种生理生态学特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
Wu Tonggui. Study on plant community succession and ecophysiology of dominant specice in Hangzhou Bay coastal wetlands[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.

[16] 代亮亮, 陈　翔, 李莉杰, 等. 贵州草海水生植物多样性及群落演替[J]. 水生生物学报, 2020, 44(4): 869-876.
Dai Liangliang, Chen Xiang, Li Lijie, et al. Aquatic plant diversity and community succession in Caohai Wetland, Guizhou Province[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(4): 869-876.

[17] 陈忠婷. 贵州草海湿地不同演替阶段植物—土壤生态化学计量学特征研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017.
Chen Zhongting. Study on chemical characteristics of plant-soil ecology in different succession stages of Caohai Wetland in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017.

[18] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1491-1503.
Xu Guangping, Li Yanqiong, Shen Yuyi, et al. Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin[J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1491-1503.

[19] 罗绪强, 张桂玲, 杨鸿雁, 等. 喀斯特山地不同退化植被下烟管荚蒾氮同位素组成的季节变化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4243-4249.
Luo Xuqiang, Zhang Guiling, Yang Hongyan, et al. Seasonal variation of nitrogen isotopic composition in the leaves of Viburnum utile from different degraded Karst plant communities[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4243-4249.

[20] 李艳琼, 沈育伊, 黄玉清, 等. 桂林会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤养分分布差异与微生物活性特征[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 24-34.
Li Yanqiong, Shen Yuyi, Huang Yuqing, et al. Soil nutrient distributions and microbial activities characteristics of different plant communities in the Huixian Karst Wetland, Guilin, China[J]. Ecological Science, 2018, 37(4): 24-34.

[21] 肖霜霜, 叶莹莹, 张　伟, 等. 干扰/利用方式对喀斯特石灰土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1140-1146.
Xiao Shuangshuang, Ye Yingying, Zhang Wei, et al. Carbon and nitrogen contents in calcareous soil aggregates by disturbance and land use in Karst Region, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(5): 1140-1146.

[22] 秦 趣, 陈忠全, 姚世美. 贵州威宁草海湿地生态安全评价[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(2): 27-33.
Qin Qu, Chen Zhongquan, Yao Shimei. Ecological safety evaluation of Caohai Lake Wetland in Weining[J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(2): 27-33.

[23] 彭益书, 杨瑞东. 贵州草海湿地 730 ka 来的环境变迁及草海未来的演化分析[J]. 地球环境学报, 2014(3): 194-206.
Peng Yishu, Yang Ruidong. Environment change of Caohai Lake, Guizhou Province from 730 ka to present and future evolution[J]. Journal of Earth Environment, 2014(3): 194-206.

[24] 王 虹, 崔桂霞. 用氯化钡缓冲液法测定土壤阳离子交换量[J]. 土壤, 1989(1): 49-51.
Wang Hong, Cui Guixia. The determination of soil cation exchange capacity by the method of barium chloride buffer solution[J]. Soil, 1989(1): 49-51.

[25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu Rukun. Analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[26] 田圣贤, 冯 盼, 杨 山, 等. 东北阔叶红松林腐殖质层土壤阳离子交换性能及其主要影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 3-12.
Tian Shengxian, Feng Pan, Yang Shan, et al. Soil cation exchange capacity and its main impact factors in the humic layer of broadleaved Korean pine forest in northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 3-12.

[27] 张珍明, 林绍霞, 张清海, 等. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳,氮,磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 199-199.
Zhang Zhenming, Lin Shaoxia, Zhang Qinghai, et al. The distribution characteristics of soil carbon,nitrogen and phosphorus under different land use patterns in Caohai Plateau Wetland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 199-199.

[28] 凌 敏, 刘汝海, 王 艳, 等. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤养分的空间异质性及其与植物群落分布的耦合关系[J]. 湿地科学, 2010(1): 92-97.
Ling Min, Liu Ruhai, Wang Yan, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and the relationship between soil nutrients and plant community in tamarix chinensis forest farm wetland of Yellow River Delta Wetland[J]. Wetland Science, 2010(1): 92-97.

[29] 杨海全, 陈敬安, 刘 文, 等. 草海沉积物营养元素分布特征与控制因素[J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 297-303.
Yang Haiquan, Chen Jing'an, Liu Wen, et al. Distribution characteristics and controlling factors of total organic carbon,total nitrogen,and total phosphorus in sediments of Caohai Lake,China[J]. Earth and Environment, 2016, 44(3): 297-303.

[30] 王军静, 白军红, 赵庆庆, 等. 哈拉海湿地芦苇沼泽土壤碳、氮和磷含量的剖面特征[J]. 湿地科学, 2014, 12(6): 690-696.
Wang Junjing, Bai Junhong, Zhao Qingqing, et al. Profile characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus inhosphorus soils of phragmites australis marshes in Halahai Wetlands[J]. Wetland Science, 2014, 12(6): 690-696.

[31] 朱四喜, 常 杰, 葛 滢, 等. 全尺度人工湿地中植物组成和多样性对基质无机氮季节动态的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(35): 10446-10449, 10465.
Zhu Sixi, Chang Jie, Ge Ying, et al. Effects of plant composition and diversity in full-scale constructed wetlands on seasonal dynamics of substrate inorganic nitrogen[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10446-10449, 10465.

[32] 王大鹏, 郑 亮, 罗雪华, 等. 砖红壤不同温度、水分及碳氮源条件下硝化和反硝化特征[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 616-622.
Wang Dapeng, Zheng Liang, Luo Xuehua, et al. Nitrification and denitrification characteristics of latosol under different temperature, moisture, carbon and nitrogen sources[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(3): 616-622.

[33] 夏志坚, 白军红, 贾 佳, 等. 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, 2015, 13(6): 702-707.
Xia Zhijian, Bai Junhong, Jia Jia, et al. Vertical distributions of contents and storage of carbon and nitrogen in soils in phragmite australis salt marshes in the Yellow River Delta[J]. Wetland Science, 2015, 13(6): 702-707.

[34] Corre M D, Schnabel R R, Stout W L. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a northeastern US grassland[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(4): 445-457.

[35] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 61: 1-13.

[36] Yamashita T, Flessa H, John B, et al. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: effect of land use[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(11): 3222-3234.

[37] Shang C, Tiessen H. Carbon turnover and carbon-13 natural abundance in organo-mineral fractions of a tropical dry forest soil under cultivation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 17044.

[38] Weber J, Chen Y, Jamroz E, et al. Preface: humic substances in the environment[J]. Journal of Soils & Sediments, 2018, 18(8): 2665-2667.

[39] 孙志高, 刘景双. 湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响因素[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1462-1467.
Sun Zhigao, Liu Jingshuang. Nitrification-denitrification and its affecting factors in wetland soil: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(6): 1462-1467.

[40] 陈忠柳, 舒英格, 周鹏鹏. 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 304-311, 319.
Chen Zhongliu, Shu Yingge, Zhou Pengpeng. Exchange and distribution characteristics of soil base ions under different ecological restoration pattern in the Karst mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 304-311, 319.