

DOI: 10.5846/stxb201808231793

梁晨,殷书柏,刘吉平.三江平原碟形洼地-岛状林土壤氮磷空间分布及生态化学计量学特征.生态学报,2019,39(20): - .

Liang C, Yin S B, Liu J P. Spatial distribution and ecological stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in soils from saucer-shaped depressions to island forests in the Sanjiang Plain. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

三江平原碟形洼地-岛状林土壤氮磷空间分布及生态化学计量学特征

梁 晨^{1,2}, 殷书柏³, 刘吉平^{1,2,*}

1 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 四平 136000

2 吉林师范大学资源保护与利用研究所, 四平 136000

3 唐山师范学院资源管理系, 唐山 130102

摘要:为阐明由碟形洼地-岛状林方向土壤养分的空间分布特征,选取非生长季中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站内的碟形洼地为研究对象,探讨土壤全氮和全磷含量及其化学计量比的空间分布特征及其影响因素。结果表明:由碟形洼地-岛状林方向,全氮、全磷和氮磷比在各样点的平均值分别呈“V”字、倒“N”字和“V”字型分布,土壤全氮、全磷与氮磷比含量的平均值分别为 2278.11 mg/kg、820.50 mg/kg 与 2.44,变异系数为全氮(51.77%)>氮磷比(36.07%)>全磷(13.65%)。在 0—50 cm 土层内,全氮、全磷和氮磷比总体呈随土壤深度增加而逐渐降低的趋势,其中全氮主要集中于不同样点土壤的中上层,各样点的最高值均分布在土壤表层区域;全磷的富集深度与全氮相同,但在土壤 20 cm 深度各样点含量相近,后在 20—50 cm 深度内呈逐渐下降趋势;氮磷比在各样点的最高值与全氮和全磷分布总体一致,富集深度与两元素呈基本一致趋势。相关性分析表明,碟形洼地-岛状林方向土壤全氮与全磷之间均呈现出良好的相关关系,其中土壤有机质的分布,植物与水文状况、季节变化和土壤温度也在养分分布中起重要作用。

关键词:全氮;全磷;生态化学计量学特征;碟形洼地-岛状林;三江平原

Spatial distribution and ecological stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in soils from saucer-shaped depressions to island forests in the Sanjiang Plain

LIANG Chen^{1,2}, YIN Shubai³, LIU Jiping^{1,2,*}

1 College of Tourist and Geoscience, Jilin Normal University, Siping 136000, China

2 Institute for protection and utilization of resource afflicted by Jilin Normal University, Siping 136000, China

3 Department of Resource Management, Tangshan Normal University, Tangshan 130102, China

Abstract: In order to illuminate the spatial distribution characteristics of soil nutrients from saucer-shaped depressions to island forests, this paper chose the saucer-shaped depression within the wetland ecological test station on the Sanjiang Plain, part of the Chinese academy of sciences, as a study site during the non-growing season, and discusses the spatial distribution characteristics of total nitrogen (TN) content, total phosphorus (TP) content, and their stoichiometric ratios and influential factors. The results showed that the average TN, TP and N/P, respectively, displayed a tendency towards “V”, inverted “N”, and “V” type distributions in soil from saucer-shaped depression to island forests, the average of each was 2278.11 mg/kg, 820.50 mg/kg and 2.44 respectively, and the Coefficient of Variation (CV) was TN (51.77%) > N/

基金项目:国家自然科学基金(41271113);吉林省科技厅项目(20180101085JC)

收稿日期:2018-08-23; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujpjl@163.com

P (36.07%) > TP (13.65%)。In soil layers from 0 to 50 cm, TN, TP, and N/P decreased gradually with increasing soil depth, but TN was mainly concentrated in the upper middle layer of soil at the different points, and the highest values at all points were found in the surface area of soil. The enrichment depth of total phosphorus was the same as that of TN, but the content was similar at various points at the depth of 20 cm in the soil, and gradually decreased within the depth of 20—50 cm. The maximum value of N/P at various points was consistent with the distribution of TN and TP, and the enrichment depth was consistent with the two elements. The correlation analysis showed that TN and TP in soils both had a good correlation from saucer-shaped depressions to island forests, and the distribution of soil organic matter (SOM), plants, hydrological conditions, seasonal variation, and soil temperature played an important role in nutrient distribution.

Key Words: total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ecological stoichiometric characteristics, from saucer-shaped depression to island forests, the Sanjiang Plain

湿地土壤系统中氮(N)和磷(P)元素循环已成为全球气候变化背景下土壤学、环境学和湿地生态学研究者们关注的焦点之一^[1]。湿地土壤中的 N、P 元素是植物矿物质养分、有机养分和土壤肥力的重要组成部分,作为湿地生态系统中的两个限制性因素,对湿地植物的生长发育、群落组成以及生态系统的结构与功能等起重要作用^[2]。受到自然与人为等多重因素耦合作用影响,湿地土壤中的 N、P 元素具有一定的空间分布特征,这会导致土壤环境的异化,进而影响动植物及微生物的动态变化、种群演替及物种竞争^[3]。目前,针对湿地土壤氮磷元素的研究主要集中于二者在生长季时期以及在人为和自然干扰下的空间分布^[4-7],而针对在非生长季自然状态下的三江平原碟形洼地不同植物群落土壤氮磷元素的空间分布研究并不多见,而非生长季的土壤元素分布状态对生长季元素的分布具有良好的基础调节作用,而且非生长季的元素积累对生长季时期土壤内部不同层次的理化性质和动植物生命过程等均具有重要影响^[8-12]。本文主要通过样线采样法研究中国科学院三江平原沼泽生态实验站内由碟形洼地-岛状林方向不同植物群落土壤 N、P 元素以及揭示 N、P 元素耦合关系的 N/P 的空间分布特征以及影响二者分布状态的自然及人文因素,以期为三江平原湿地土壤氮磷调控以及化学元素分布与循环模式研究提供科学参考。

1 材料与方法

非生长季与生长季相比,湿地土壤内部的养分元素稳定性较强,而且此时土壤已冻结,采样不易破坏土体结构,有助于实验的准确性和科学性。由于从 1986 年开始,中国科学院东北地理与农业生态研究所在别拉洪河和浓江的河间地带建立中国科学院三江平原沼泽生态实验站,为了进行湿地科学研究而用,所以保护较好,而且碟形洼地-岛状林是该区较为特殊的景观,也受到了良好保护,所以该区域现在仍是碟形洼地-岛状林的代表性与典型性区域。2014 年非生长季,在该站内碟形洼地-岛状林方向设置宽 5 m 的样线,并在样线上不同植物群落中选取 4 个样点采样。观测样地的面积约 4 hm²,中心地理经纬度坐标为 47°35′11″N 和 133°30′35″E。三江平原属温带季风气候区,年均温 1—4℃,年降水量 500—650 mm,湿地植物种类繁多且多呈群落状态分布,岛状林植物主要有柴桦 (*Betula fruticosa*)、黄耆 (*Astragalus membranaceus*. Bunge)、毛榛 (*Corylus mandshurica*. Maxim) 等,由岛状林-碟形洼地方向植物群落为漂筏苔草-芦苇群落 (*Carex pseudocuraica-Phragmites communis* community, 样点 1),毛果苔草群落 (*Carex lasiocarpa* community, 样点 2),乌拉苔草群落 (*Carex meyeriana* community, 样点 3),沼柳-小叶章群落 (*Salix rosmarinifolia-Calamagrostis angustifolia* community, 样点 4) 等,而且各植物群落土壤依次为泥炭土,泥炭沼泽土,潜育草甸沼泽土,潜育草甸白浆土^[13](图 1)。

垂直方向上,利用长 130 cm,口径为 56 mm 的带衬管的原状取土器(ZL201210534424.7)按照由表层到底层方向在野外进行采样,该取土器采集土壤样品时能够避免上下层样品互相干扰和不同层次样品间的相互污染,所采集土样平均深度为 50 cm,并按 5 cm 长度划分层次,放入不同的密封袋中并编号,记录采样深度等信

息。本研究将风干的土样,利用半微量凯氏定氮法测定全氮含量^[14],使用酸溶-钼锑钨比色法测定全磷含量^[15],采用重铬酸钾-外加热法测定土壤有机质含量^[14];在生长季进行植物样方检测生物量,并测量不同植物群落所处的积水深度,水文条件可分为季节性积水和常年性积水两类,利用直插式土壤温度计(德国 STEPS)分别在 5 月 25 日、6 月 29 日和 8 月 6 日的 8:00,12:00 和 20:00 测定土壤温度并计算得到平均值。使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件分别进行空间分布图绘制和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 碟形洼地-岛状林方向各样点全氮与全磷含量的空间分布特征

全氮与全磷在湿地土壤垂直方向上 0—50 cm 的含量分别在 492.95—7117.42 mg/kg 和 357.34—1861.01 mg/kg 之间。其中全氮含量在样点 1 和样点 3 处呈现先减少后增加再减少的趋势,突增点均位于土壤的中上层部位,而样点 2 和样点 4 均呈现随土壤深度的增加,全氮含量逐渐下降的趋势,且各样点全氮含量在 50 cm 深度处越来越趋近于一致;全磷含量在样点 1 和样点 4 均呈现先增加后减少再增加再减少的分布状况,样点 3 和样点 2 总体上呈现逐渐下降的趋势,而且全磷在 15—20 cm 土深范围内含量相近(图 2)。由碟形洼地中心到岛状林,全氮与全磷在各样点的平均值分别呈“V”字型和倒“N”字型分布,最高值分别出现在样点 1 与样点 3,且两种元素的标准差与变异系数均是全氮(51.77%)>全磷(13.65%),这说明全氮含量空间分异性要远远高于全磷(表 1)。通过相关性分析,可得出各样点全氮与全磷均呈极显著相关($P<0.01$),样点 2(0.933)>样点 4(0.911)样点 3(0.860)>样点 1(0.799),相关性有碟形洼地到岛状林方向呈先增后减再增的“N”字型规律。

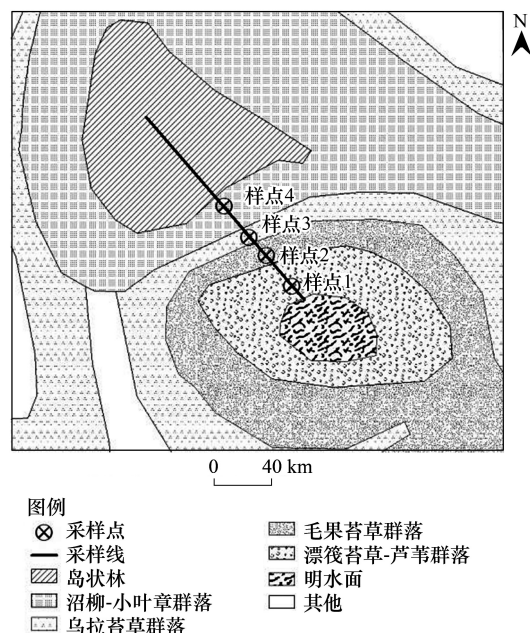


图 1 观测样带示意图

Fig.1 The sketch map of research sample

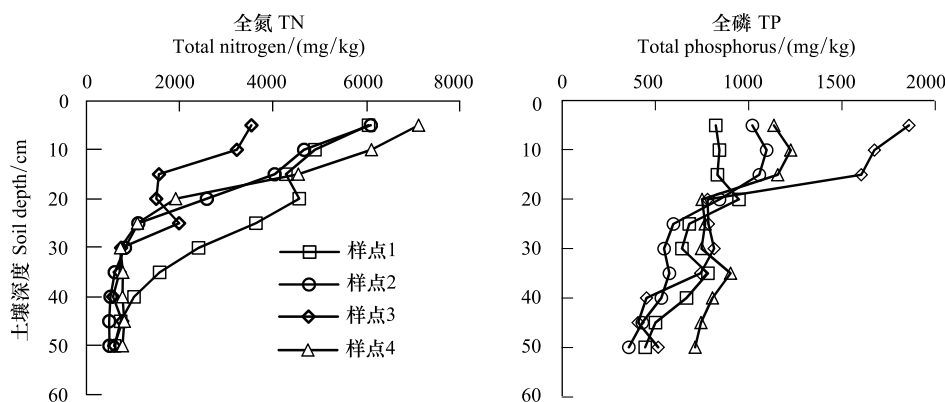


图 2 碟形洼地-岛状林方向各样点垂直方向上 50 cm 全氮与全磷的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of total nitrogen and total phosphorus 50 cm in the vertical direction from saucer depression to island forests

2.2 碟形洼地-岛状林方向各样点全氮与全磷含量的化学计量学特征

与全氮和全磷的空间分布特征相比,氮磷比(N/P)的空间分布特征更能全面地阐述氮和磷元素耦合的空间变化^[15]。氮磷比在湿地土壤垂直方向上 0—50 cm 的数值范围是 0.56—7.34。样点 1 和样点 3 氮磷比的分

布特征分别为先减后增再减和先增后减,样点 2 与样点 4 则呈现随土壤深度增加而逐渐降低的趋势,除样点 3 外,其余各样点氮磷比最大值均集中于土壤 0—10 层次内,其中总体最大值分布在样点 1 表层部位(图 3)。各样点氮磷比平均值呈“V”字型规律分布,样点 1(3.85)>样点 2(2.51)>样点 4(1.76)>样点 3(1.65)。通过标准差与变异系数的计算,氮磷比(0.88 和 36.07%)在各样点的离散程度在全氮和全磷含量的变异水平之间。

表 1 碟形洼地-岛状林方向各样点全氮与全磷含量平均值空间分布及标准差、变异系数

Table 1 Standard deviation and Coefficient of Variation and spatial distribution of average value of total nitrogen and total phosphorus from saucer depression to island forests

种类 Type	样点 1 Sample1/ (mg/kg)	样点 2 Sample2/ (mg/kg)	样点 3 Sample3/ (mg/kg)	样点 4 Sample4/ (mg/kg)	平均值 Average/ (mg/kg)	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
全氮 TN Total nitrogen	2977.04	2145.01	1522.64	2467.73	2278.11	1179.46	51.77
全磷 TP Total phosphorus	716.96	705.51	964.00	895.53	820.50	111.99	13.65

3 讨论与结论

3.1 讨论

湿地土壤养分的空间分布受到多种环境因素的影响,其中水文条件通过水文周期的变化以及地表水和地下水的运动对养分进行调节,植物在耦合水分条件的基础上,根据自身生长发育的需要,吸收、累积、迁移和转化土壤养分,土壤有机质同作为营养元素,对氮磷的调节十分重要,受土壤温度和季节变化的影响,土壤内的生物活动存在较大差异,从而影响了非生长季氮磷养分的分布特征。

3.1.1 水文条件与植物群落对碟形洼地-岛状林方向各样点土壤氮磷分布的影响

湿地土壤的水文条件是其最基本最重要的物理特征之一,它对氮磷元素的迁移与转化以及植被的生长状

况具有重要影响。土壤的水文条件受降水以及径流的影响,也影响着土壤元素的有效性,改变着植物的营养吸收能力和光合能力^[16]。植被是湿地生态系统物质和能量流动最重要的环节,其植被群落特征和分布影响着湿地土壤养分的空间分布差异。一方面,植物可以通过根系直接吸收同化土壤中的氮磷元素将其转变成自身体内的核酸、磷脂类化合物等有机成分,并通过枯落物归还进入土壤;另一方面,湿地植物通过改变根区的微环境,如土壤水分、pH 值及土壤机械组成等因子而间接影响土壤中氮磷元素的分布^[17]。土壤全氮和全磷的分布状态主要受在湿地淹水的条件下,土壤处于还原状态的影响,导致土壤中的氮和磷等元素无法发生矿化作用,从而可保持在土壤各层次内;由于漂筏苔草-芦苇群落位于湿地中心位置,处于湿地水位较高地带,能够有效抑制植物体分解产生和土壤自身的氮磷元素矿化分解,导致氮磷元素以有机状态赋存于植被下层土壤中并被植物固定于土壤中上层;而毛果苔草群落相对于漂筏苔草-芦苇群落,其水位呈下降趋势,但仍处于水中,加之毛果苔草群落生物量(304 g/m²)为各群落最高,所以更有利于氮磷元素在还原环境下的积累,但该群落植物的丰富度和多样性均较高,一定程度上会导致部分营养元素被利用和吸收,氮磷含量相对下降;而乌拉苔草群落和沼柳-小叶章群落均已靠近湿地边缘,土壤水分含量较低,土壤处于氧化还原过渡环境下,其中的

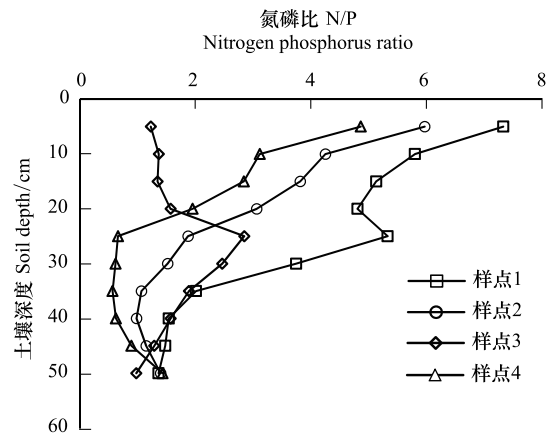


图 3 碟形洼地-岛状林方向各样点垂直方向上 50cm 氮磷比的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of N/P ratio 50cm in the vertical direction of samples from saucer depression to island forests

氮磷元素在矿质化的作用下易发生释放,而且植物的吸收也会导致土壤中养分含量降低,加之乌拉苔草的生物量(231.60 g/m^2)为各群落最低,因此乌拉苔草群落元素含量降低较快,但在沼柳-小叶章群落植物生物量(241.77 g/m^2)仅次于漂筏苔草-芦苇群落(266.90 g/m^2),而且土壤的通气性较好,元素矿化程度较高,但物种丰富度和多样性仅次于毛果苔草群落,虽然一定程度上会导致元素被转移利用,但更有利于将植物凋落物和土壤中原有的氮磷元素集中起来,所以在该群落氮磷含量呈现出次高峰。

3.1.2 土壤有机质对碟形洼地-岛状林方向各样点土壤氮磷分布的影响

土壤有机质的分解矿化是氮磷受其作用的过程。一般来说,湿地生态系统中养分间的循环是密切相关的,碳氮磷的生物地球化学循环具有耦合作用,土壤有机质对氮磷的矿化和固持具有调控作用^[18-19]。本研究土壤中土壤有机质含量范围在0.62%—15.90%之间,各样点垂直分布与全氮基本一致,均随土壤深度的增加,元素含量逐渐降低,虽然土壤有机质分布与全磷和氮磷比的分布存在差异性,但均为总体上随土壤深度的增加而元素含量逐渐减少(图4),而且在元素平均值水平分布为样点1(6.58%)>样点4(5.31%)>样点2(4.70%)>样点3(2.92%),标准差(1.32%)和变异系数(27.05%)表明其变异程度在全磷与全氮之间,且分布上与全氮和氮磷比较为一致,这在一定程度上解释了土壤有机质与氮磷分布的关系;加之除乌拉苔草群落处土壤有机质与氮磷比不存在极显著相关外,其他样点全氮、全磷与土壤有机质之间均存在极显著相关($P<0.01$)(表2),这表明土壤有机质对于氮磷分布状况具有显著影响,有机质的矿化对于氮磷的转化和循环具有强大的促进作用。

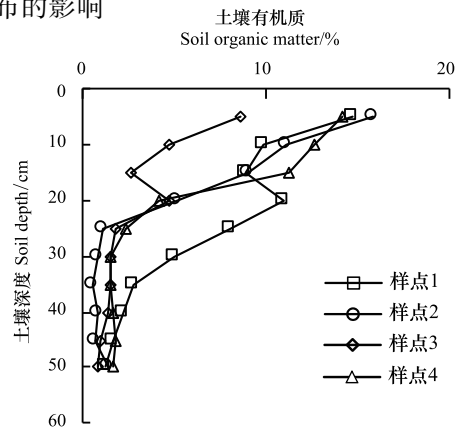


图4 碟形洼地-岛状林方向各样点垂直方向上50 cm土壤有机质的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil organic matter 50 cm in the vertical direction of samples from saucer depression to island forests

表2 碟形洼地-岛状林方向各样点土壤有机质与全磷、全氮及氮磷比的相关性

相关性 Correlation	土壤有机质 SOM Soil organic matter			
	样点1 Sample1	样点2 Sample2	样点3 Sample3	样点4 Sample4
全氮 TN Total nitrogen	0.990 **	0.993 **	0.976 **	0.993 **
全磷 TP Total phosphorus	0.770 **	0.891 **	0.782 **	0.928 **
氮磷比 N/P Nitrogen phosphorus ratio	0.969 **	0.987 **	-0.248	0.945 **

** $P<0.01$, * $P<0.05$

3.1.3 季节变动对碟形洼地-岛状林方向各样点土壤氮磷分布的影响

氮磷是湿地生态系统物质循环和能量流动过程中所必需的大量元素,Tateno 等人指出湿地生态系统活动易受氮磷的限制^[20]。本研究全氮和全磷含量分布受淹水条件的改变、植被群落的差异以及非生长季元素积累等综合因素影响,导致除乌拉苔草群落外,土壤氮、磷以及氮磷比三者间均存在显著相关($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$)(表3)。这主要是因为,在生长季条件下,由于适合的温度以及降水条件,导致湿地内的生态条件在不受其他外部干扰的情况下越来越有利于土壤养分的积累,其中以土壤动物和微生物的降解作用最为主要,其通过完整的生物过程将植物凋落物中的养分分解并通过新陈代谢归还到土壤当中,加之降水的淋溶作用以及植物的吸收固定作用,使养分半稳定地分布于土壤各个层次,直至到底层分布殆尽;而非生长季的环境条件变得不适宜于生命活动,分解者大多已死亡,这就导致生长季所形成的养分分布局面得到一定程度的维持,也就是由于植物的根系吸收,养分较集中地分布于土壤中上层,而土壤下层由于土体的变异性较高且淋溶作用难以到达而含量减少^[21],而乌拉苔草群落的相关性出现异常,主要是由于全氮和全磷的含量分别呈

现出水平方向上的最低值和最高值,氮磷比也随之呈现出水平方向上的最低值,由于氮磷平均含量最值的差异性较大,所产生的元素含量波动也会相应增大,元素间的关系不确定增加,最终导致群落土壤氮磷元素与二者耦合关系的相关性不显著。

表 3 碟形洼地-岛状林方向各样点全氮、全磷与氮磷比的相关性

相关性 Correlation	氮磷比 N/P Nitrogen phosphorus ratio			
	样点 1 Sample1	样点 2 Sample2	样点 3 Sample3	样点 4 Sample4
全氮 TN Total nitrogen	0.980 **	0.992 **	-0.111	0.956 **
全磷 TP Total phosphorus	0.694 *	0.895 **	-0.212	0.787 **

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

3.1.4 土壤温度对碟形洼地-岛状林方向各样点土壤氮磷分布的影响

土壤温度是影响湿地生态环境的重要因素之一,对地温的深入研究不仅有利于把握湿地土壤呼吸作用的规律,还可以进一步探究在土壤温度及其所产生的结果影响下湿地土壤养分的空间分布特征^[22-23]。由表 4 可以看出在生长季的 3 个月份里,不同湿地植物群落由碟形洼地向岛状林的土壤平均温度均呈现不断上升的趋势。土壤温度的变化与深度、植物以及太阳辐射等因素有密切关系,沼柳-小叶章群落和乌拉苔草群落由于土壤含水量较低,受太阳辐射的变化影响逐渐增强,日际和年际温度变化较显著,加之植被条件的影响,导致了“氮消磷涨”的水平分布局面,在该乌拉苔草群落处出现了全磷峰值,沼柳-小叶章群落氮磷含量的增高主要因为其较高的生物量和生长季土壤动物和微生物分解机制,从而能够为土壤提供大量的营养元素;而随着向湿地中心延伸,水分含量不断增加,各植物群落土壤温度受湿地冷湿效应的影响逐渐增强,但其正是由于较低的土壤温度和较好的淹水条件,才导致漂筏苔草-芦苇群落和毛果苔草群落下层土壤中氮磷含量维持在较高水平(表 4)。

表 4 碟形洼地-岛状林方向不同湿地植物群落生长季土壤温度平均值(℃)

Table 4 The average of soil tempreture in different wetland plant communities from saucer depression to island forests during growing season

月份 Month	漂筏苔草-芦苇群落 <i>Carex pseudocuraica- Phragmites cmmunis</i> community	毛果苔草群落 <i>Carex lasiocarpa</i> community	乌拉苔草群落 <i>Carex meyeriana</i> community	沼柳-小叶章群落 <i>Salix rosmarinifolia- Calamagrostics angustifolia</i> community
5 月 May	7.52	7.61	11.44	11.67
6 月 June	13.29	16.94	18.85	18.94
8 月 August	18.82	19.52	19.60	19.99

3.2 结论

- (1)全氮含量在漂筏苔草-芦苇群落和乌拉苔草群落呈随土壤深度的增加,先减少后增加再减少的趋势,而在毛果苔草群落和沼柳-小叶章群落中则呈逐渐下降的趋势。全磷含量在漂筏苔草-芦苇群落和沼柳-小叶章群落均随土壤深度的增加,呈现先增加后减少再增加再减少的趋势,而在乌拉苔草群落和毛果苔草群落总体上均呈现逐渐下降的趋势。氮磷比的垂直分布趋势总体上与全氮和全磷相似,仅在样点 3 的 20—30 cm 处呈现小幅增加趋势。由碟形洼地到岛状林,全氮、全磷与氮磷比在各样点的平均值分别呈“V”字、倒“N”字和“V”字型分布。
- (2)由变异系数可知,土壤氮磷间具有空间异质性:全氮(51.77%)>全磷(13.56%),相关性分析表明,土壤全氮和全磷存在极显著相关($P < 0.01$),土壤 N/P(36.07%)也表现出空间异质性,并与土壤全氮和全磷存在显著相关($P < 0.05$)或极显著相关($P < 0.01$)。
- (3)土壤有机质的分布是全氮和全磷分布的关键影响因子,植物与水文状况、季节变化和土壤温度对养

分的空间分布也起重要作用。

参考文献 (References):

- [1] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [2] Han W X, Fang J Y, Cuo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [3] 郭畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展. 中国沙漠, 2010, 30(2): 296-302.
- [4] 刘吉平, 梁晨, 马长迪. 孤立湿地功能研究进展. 地理科学, 2018, 38(8): 1357-1363.
- [5] 张新厚, 谭稳稳, 张加双, 宋长春. 磷添加对三江平原湿地小叶章立枯质量和分解的影响. 生态环境学报, 2018, 27(2): 209-215.
- [6] 欧阳威, 徐逸, 黄浩波, 杨万新, 王丽. 东北低温农区近四十年气温降水变化及其对面源氮磷输出影响. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1285-1292.
- [7] 陈慧敏, 石福习, 杨桂生, 张新厚, 毛瑯. 养分添加对三江平原沼泽化草甸植物群落组成和地上生物量的影响. 生态学报, 2016, 35(6): 1440-1446.
- [8] 屈凡柱, 孟灵, 付战勇, 孙景宽, 刘京涛, 宋爱云. 不同生境条件下滨海芦苇湿地 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2018, 35(5): 1731-1738.
- [9] 郑洁, 刘金福, 吴则焰, 洪伟, 何中声, 蓝亦琦, 刘思迪. 闽江河口红树林土壤微生物群落对互花米草入侵的响应. 生态学报, 2017, 37(21): 7293-7303.
- [10] 雷学明, 段洪浪, 刘文飞, 纪宇毓, 周际海, 吴建平, 樊后保. 鄱阳湖湿地碟形湖泊沿高程梯度土壤养分及化学计量研究. 土壤, 2017, 49(1): 40-48.
- [11] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. 地理科学, 2014, 34(8): 994-1001.
- [12] 江姗, 赵光影, 臧淑英, 邵宗仁. 排水对小兴安岭森林沼泽湿地溶解性有机碳和有效氮磷的影响. 生态学报, 2017, 37(5): 1401-1408.
- [13] 韩晓君. 三江平原湿地生态系统保护研究进展. 黑龙江水利科技, 2016, 44(4): 115-118.
- [14] Tete E, Viaud V, Walter C. Organic carbon and nitrogen mineralization in a poorly-drained mineral soil under transient waterlogged conditions: an incubation experiment. European Journal of Soil Science, 2015, 66(3): 427-437.
- [15] 李英臣, 宋长春. 氮磷输入对湿地生态系统碳蓄积的影响. 土壤通报, 2012, 43(1): 224-229.
- [16] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 张宪洲, 沈振西, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3399-3406.
- [17] Sulman B N, Desai A R, Schroeder N M, Ricciuto D, Barr A, Richardson A D, Flanagan L B, Lafleur P M, Tian H Q, Chen G S, Grant R F, Poulter B, Verbeeck H, Ciais P, Ringer B, Baker I T, Schaefer K, Luo Y Q, Weng E S. Impact of hydrological variations on modeling of peatland CO₂ fluxes: results from the North American Carbon Program site synthesis. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(G1): G01031.
- [18] Moseman-Valtierra S, Abdul-Aziz O I, Tang J W, Ishtiaq K S, Morkeski K, Mora J, Quinn R K, Martin R M, Egan K, Brannon E Q, Carey J, Kroeger K D. Carbon dioxide fluxes reflect plant zonation and belowground biomass in a coastal marsh. Ecosphere, 2016, 7(11): e01560.
- [19] 刘吉平, 杜保佳, 盛连喜, 田学智. 三江平原沼泽湿地格局变化及影响因素分析. 水科学进展, 2017, 28(1): 22-31.
- [20] Taten M, Chapin III F S. The logic of carbon and nitrogen interactions in terrestrial ecosystems. The American Naturalist, 1997, 149(4): 723-744.
- [21] 毛庆功, 鲁显楷, 陈浩, 莫江明. 陆地生态系统植物多样性对矿质元素输入的响应. 生态学报, 2015, 35(17): 5884-5897.
- [22] Boulogne I, Ozier-Lafontaine H, Merciris P, Vaillant J, Labonte L, Loranger-Merciris G. Soil chemical and biological characteristics influence mineralization processes in different stands of a tropical wetland. Soil Use and Management, 2016, 32(3): 269-278.
- [23] Liu Y, He N P, Wen X F, Xu L, Sun X M, Yu G R, Liang L Y, Schipper L A. The optimum temperature of soil microbial respiration: Patterns and controls. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 121: 35-42.