

神农架大九湖亚高山典型泥炭湿地土壤养分特征分析

斯南雍茜^{1,2,3}, 葛继稳^{1,2,3}, 李愈^{1,2,3}, 李永福⁵,

刘焱焱^{1,2,3}, 甘娟⁴, Ihab ALFADHEL^{1,2,3}, 张志麒⁶

(1.中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地,武汉 430074;

2.中国地质大学(武汉)湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室,武汉 430074;3.中国地质大学(武汉)

生态环境研究所,武汉 430074;4.武汉伟特伦生态环境研究所,武汉 430079;

5.新疆农业科学院,乌鲁木齐 830091;6.湖北神农架国家湿地公园管理局科研所,湖北神农架林区大九湖乡 442421)

摘要: 基于湖北省神农架国家公园大九湖亚高山典型泥炭湿地土壤总有机碳、总氮、总磷、铵态氮、有效磷、速效钾养分含量进行时间(春、夏、秋、冬)和空间(表层 15 cm、中层 30 cm、底层 45 cm)特征分析。结果表明:(1)该区域土壤各样分以及 pH、*Eh*、容重均满足正态分布,其中有效磷、速效钾为中强变异性,均值为 31.33,71.2 mg/kg,总有机碳、总磷、铵态氮、pH、*Eh*、容重为中弱变异性,均值为 419.2,1.56 g/kg 和 67.57 mg/kg, 5.33,104.4,0.155 g/kg,总氮为弱变异性,均值为 20.13 g/kg。(2)土壤总有机碳在季节以及深度变化上均不存在显著差异,总氮与总磷在首层与其余 2 层存在显著差异,在季节上总氮在首层存在季节差异,总磷在首、中层存在显著差异,土壤养分仅速效钾与首层和其余 2 层存在显著差异。(3)土壤有机碳、总磷、铵态氮与总氮、速效钾、总磷与铵态氮呈显著正相关,总有机碳与土壤容重、有效磷与 *Eh*, pH 与 *Eh* 呈显著负相关。(4)研究区土壤总有机碳与总氮较高于我国其余泥炭湿地,随着纬度升高土壤有机碳含量呈现降低的趋势。

关键词: 泥炭湿地; 总有机碳; 土壤速效养分; 时空变化特征

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0321-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.044

Soil Nutrient Characteristics of Typical Sub-alpine Peat Wetland in Dajiuhu of Shennongjia

SINAN Yongxi^{1,2,3}, GE Jiwen^{1,2,3}, LI Yu^{1,2,3}, LI Yongfu⁵,

LIU Yaoyao^{1,2,3}, GAN Juan⁴, Ihab ALFADHEL^{1,2,3}, ZHANG Zhiqi⁶

(1.Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-restoration, China University of Geosciences,

Wuhan 430074; 2.Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution and Ecological Restoration, China University

of Geoscience, Wuhan 430074; 3.Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of

Geosciences, Wuhan 430074;4.Wuhan Wetland Institute of Ecology and Environmental Sciences, Wuhan 430079;

5.Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091; 6.Institute of Hubei Shennongjia National Wetland

Park Administration Bureau, Dajiuhu Township of Shennongjia Forestry Administrattve District, Hubei 442421)

Abstract: Based on the analysis of soil total organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the typical sub-alpine peat wetland of Dajiuhu in Shennongjia National Park of Hubei Province, the temporal (spring, summer, autumn, and winter) and spatial (surface 15 cm, middle 30 cm, and bottom 45 cm) characteristics were analyzed. The results showed that: (1) The distribution of soil nutrient components, pH, *Eh*, and bulk density was normal, in which Apo. and Aph. K were medium and strong variability, the mean value was 31.33 and 71.2 mg/kg. TOC, TP, An., pH, *Eh*, and bulk density were medium and weak variability, and the mean value was 419.2, 1.56 g/kg, 67.57 mg/kg, 5.33, 104.4, 0.155 g/kg; TN is weakly variable, the mean value was 20.13 g/kg. (2) There was no significant difference in soil TOC in season and depth. There was significant difference between TN and TP in the first layer and the other two layers. There was seasonal difference between TP in

收稿日期:2020-02-04

资助项目:国家自然科学基金项目(31971490)

第一作者:斯南雍茜(1993—),女,硕士研究生,主要从事湿地生态研究。E-mail:1249918248@qq.com

通信作者:葛继稳(1965—),男,教授,博导,主要从事湿地生态及保护生物研究。E-mail:gejiwen2002@aliyun.com

the first layer and TP in the first and middle layers. Only Aph. was significantly different from the first and the other two layers. (3) TOC, TP, An. and TN, Apo., TP, and An. showed significant positive correlations. TOC and soil bulk density, Apo. and E_h , pH and E_h , showed significant negative correlations. (4) TOC and TN in the study area were higher than other peat wetlands in China, and the content of soil organic carbon decreased with the increase of latitude.

Keywords: peat wetland; total organic carbon; soil available nutrient; temporal and spatial variation characteristics

泥炭湿地是重要的生态系统类型,其所特有的生态结构与功能保存了大量的泥炭沉积与环境信息^[1]。泥炭湿地具备涵养水源、净化水质、调节气候以及维系生物多样性等特殊的生态功能,对气候变化有着重要的意义^[2]。湿地土壤有机碳对气候变化极为敏感,能对气候变化做出明显的响应^[3]。湿地土壤中氮与磷含量对湿地生态系统的生产力影响显著^[4]。铵态氮、有效磷、速效钾均为湿地植被可直接吸收利用的重要养分,三者含量的变化对土壤中氮、磷、钾迁移与转化过程以及生态系统中水—陆—生物界面物质和能量交换过程都会产生显著影响^[5-7],且三者含量以及季节变化特征能反映其不同时间段的养分供给状况与可利用水平^[8-9]。

近年来,国内对泥炭湿地土壤养分的相关研究主要集中在艾比湖湿地、若尔盖泥炭湿地、三江平原沼泽湿地、尕斯库勒湖湿地等。高俊琴等^[10]和田应兵等^[11]分别对若尔盖高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及泥炭湿地土壤恢复与演替过程中土壤养分变化进行了研究;王勇辉等^[12]对艾比湖湿地泥炭土壤养分进行了空间尺度上的特征分析;何太蓉等^[7]对三江平原泥炭沼泽土剖面磷、钾及其速效养分分布特征及环境影响进行了研究;孙志高等^[5,13]对该区腐殖质沼泽土进行了土壤硝态氮和铵态氮含量季节变化特征以及空间分布格局研究;王元峰等^[14]和吴江琪等^[15]分别对尕斯库勒湖泥炭和沼泽化草甸土壤的理化性质和不同地下水土壤理化特征进行了比较分析。

神农架大九湖泥炭湿地属于我国南方亚高山典型泥炭沼泽湿地,在世界中纬度地区具代表性、独特性、典型性,同时其独特的气候变化和生态环境的敏感性与重要性,在全国生态研究中具有重要的地位。近年来已有学者^[16-18]对该区碳通量排放进行了研究。经文献查阅发现,对该区泥炭湿地土壤特征研究较少。本文对神农架大九湖亚高山泥炭湿地土壤养分指标总有机碳(total organic carbon, TOC)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、铵态氮(ammonium nitrogen, An.)、有效磷(available phosphorus, Aph.)、速效钾(available potassium, Apo.)进行了原位采样和室内实验,综合土壤化学、统计学等方法,揭示该

区土壤养分时空特征,以期为该区泥炭湿地碳通量及气候变化研究提供基础数据,同时为科学评价该区土壤质量、湿地环境演变,以及湿地生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于湖北省神农架国家公园大九湖三号湖附近(31°28′44.45″N, 110°00′14.61″E)的涡度通量塔附近。该区属亚高山泥炭藓沼泽湿地生态系统,其泥炭厚度高达 2 m 以上^[19],典型泥炭湿地面积约为 2.5 hm²^[20],平均海拔高度 1 758 m,属亚高山寒温带潮湿气候,具有冬长夏短的特点,日照较短,气候温凉。年均气温 7.4 °C,最高气温出现在 7 月,最低温度出现在 1 月,无霜期 144 天,全年日照时间 1 000 h 左右,平均每天日照时间 2.7 h;年均降水量为 1 528.3 mm,降水丰富且分布均匀,云雾天气较多,相对湿度 > 80%。研究区成土母岩主要为冲积物和湖积物,受水位影响土壤类型以沼泽土、草甸沼泽土和草甸土为主。该区植物资源较单一,已记录到高等植物 46 科 83 属 98 种,其中植被优势种为泥炭藓(*Sphagnum palustre*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)等^[21]。

2 材料与方法

2.1 土样采集

土壤样品以通量塔为中心点(FJ)向其四周对角外扩 30~45 m,分别于 WS、ES、EN、WN 处采样。土样采样时间为 2018 年 6, 9, 12 月和 2019 年 3 月,分别代表夏季、秋季、冬季、春季。用环刀在 15, 30, 45 cm 土层深度处取样(分别代表表层、中层和底层),同时为减小采样产生的误差,每层剖面进行 3 次重复取样,并对同一层土样进行等层间混合取样。样品用塑封袋密封于冰箱(4 °C)中保存,带回实验室后再室内自然风干,去除植物根系后进行土壤养分测定。

2.2 土样测试

使用 IQ150 便携式仪器(IQ Scientific Instruments, USA)进行 pH、 E_h 数据测定,研究区土壤 pH 为 5.33,呈酸性土壤,黄咸雨等^[22]2017 年测定区域内土壤呈酸性,与本研究结果一致。因此,本次研究土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定采用联合浸提—比色法^[23]。土壤容重采用环刀法测定。

TOC 测定使用中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地提供的德国 ELEMENTAR liqui TOC 分析仪,使用前干燥土壤需在 5% 盐酸中静置 12 h 去除无机碳后,蒸馏水冲洗 3~4 次,至溶液为中性,土壤烘干,过 0.075 mm 细筛待测。全氮采用半微量开式法,全磷采用 $\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液氧化-钼锑抗比色法^[23]测定。

2.3 数据处理

数据处理与分析使用统计分析软件 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析(ANOVA),LSD 多重比较分析。相关图形绘制基于 Origin 8.0 完成。

3 结果与分析

3.1 泥炭湿地土壤不同土层养分指标特征

由表 1 可知,神农架泥炭湿地土壤总有机碳 TOC 极大值与极小值为 574.6,187.93 k/kg,土壤总氮 TN 含量极大值与极小值为 26.7,13.7 g/kg,土壤总磷 TP 含量极大值与极小值为 2.47,0.85 g/kg,速效养分极大值与极小值分别为铵态氮 An.为 81.43,26.35 mg/kg,有效磷 Aph.为 2.47,0.85 mg/kg,速效钾含 Apo.为 146.86,8.20 mg/kg,土壤 pH 为 4.85~6.52,土壤 Eh 为 13.4~235.1,土壤容重为 0.11~0.32 g/kg。通过对研究区各土壤指标进行样本 Kolmogorov-Smirnov 检验发现,研究区土壤各项指标均

符合正态分布及渐进显著性远大于 0.05,且研究区泥炭湿地土壤各项指标存在的变异情况分别为:中强变异性($0.5 < CV \leq 1$)有效磷、速效钾;中弱变异性($0.1 < CV \leq 0.5$)铵态氮、总有机碳、总磷含量、pH、Eh、容重;弱变异性($CV \leq 0.1$)总氮。

表 1 大九湖泥炭湿地各土壤指标及统计特征

土壤指标	极小值	极大值	均值	变异系数 CV	正态分布 K-Sig
TOC/(g·kg ⁻¹)	187.90	574.60	419.20	0.20	0.158
TN/(g·kg ⁻¹)	13.70	26.72	20.13	0.10	0.39
TP/(g·kg ⁻¹)	0.85	2.47	1.56	0.23	0.32
An/(mg·kg ⁻¹)	26.35	81.43	67.57	0.15	0.23
Apo/(mg·kg ⁻¹)	8.20	146.86	71.20	0.53	0.185
Aph/(mg·kg ⁻¹)	0.85	2.47	31.33	0.50	0.175
pH	4.85	6.52	5.33	0.15	0.71
Eh	13.40	235.10	104.40	0.47	0.09
容重/(g·kg ⁻¹)	0.110	0.320	0.155	0.310	0.370

3.2 泥炭湿地土壤养分含量时空变化特征

对研究区湿地土壤各样分进行 LSD 方差分析比较可知,神农架大九湖亚高山典型泥炭湿地土壤总有机碳、铵态氮、有效磷在不同深度以及各季节上均值差异不显著,总氮、总磷在季节以及深度上差异较显著(图 1)。

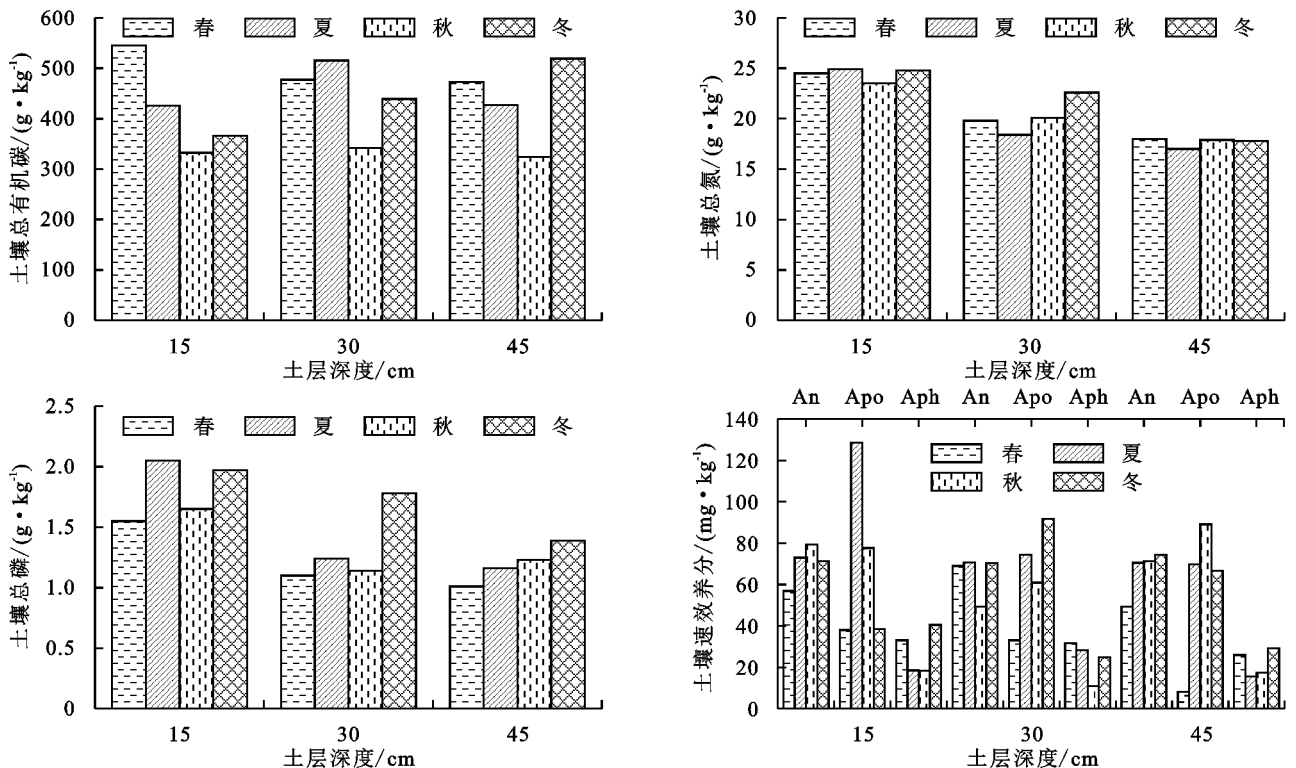


图 1 大九湖泥炭湿地土壤各养分含量时空变化

研究区 TOC 均值在季节与不同深度均不存在显著差异,其含量在不同季节以及不同深度土层变化规律为:在春季随土层深度增加含量逐渐减少,

其值分别为 544.81,477.25,473.11 g/kg,夏、秋季土壤 TOC 含量在中层较高,其含量分别为春(426.15,515.33,426.79 g/kg),秋(332.34,342.32,324.45 g/

kg) 冬季土壤含量则随土层深度增加逐渐增大,其值分别为 366.04, 439.17, 519.44 g/kg, 各季节中春季含量高于其余季节, 该区域 TOC 均值为 419.2 g/kg。

该区域土壤总有机碳在季节以及不同深度无显著变化, 可能与该湿地土壤泥炭厚度高达 2 m 有关, 泥炭变化与其累计地质历史环境有显著相关性^[19]。该种含量变化可能与地表在泥炭藓的覆盖导致蒸发量小, 积水时间长从而减少了干湿交替, 加快了有机质矿化分解有关, 而在冬季, 表层光照时长和降雨量都相应减少, 使得在该季节里有机质矿化分解慢于其余季节, 而较深层地下冻层的存在又使水分难以下渗, 微生物种类和数量下降, 导致有机质分解矿化速度减弱, 利于有机碳的累积^[24]。

研究区 TN 均值在各季节首层(0—15 cm)、中间层(15—30 cm)与底层(30—45 cm)含量均为随土层深度的增加含量逐渐减少, 其中首层与其余 2 层存在显著差异。秋季与其他季节间存在显著差异, 在秋季土壤 TN 随深度增加其含量逐渐降低, 其值分别为 23.6, 21.0, 17.9 g/kg。土壤总氮含量在秋季与其余季节存在差异, 研究区 TP 含量在各季节首层含量均显著高于其余 2 层, 在土层深度首层与其余 2 层存在显著差异, 同时在首层存在夏、冬季与春、秋季存在差异, 其值分别为: 2.05, 1.97 与 1.55, 1.65 g/kg, 在中间层冬季与其余季节存在显著差异, 差值分别为 0.68, 0.54, 0.64 g/kg, 春、夏、冬季节上随土层深度增加逐渐降低, 在秋季中间层较低。

速效养分含量包括土壤铵态氮、有效磷、速效钾, 其中仅速效钾在夏季土壤与其余 2 层存在显著差异, 其含量变化分别为 128.50, 74.36, 69.81 mg/kg。铵态氮与有效磷均不存在显著差异。铵态氮均值在土层深度变化上无显著差异, 在季节变化上存在差异, 夏季含量出现最高值, 秋季出现最低值。夏季降雨量大, 温度较高创造了有机氮矿化的有力条件, 但由于植被在该季节吸收利用率较高, 导致夏季含量高于秋季, 这一规律与孙志高等^[13]的三江平原沼泽湿地铵态氮季节变化规律相一致。由于秋季相对较干的季节更易于生物固氮, 土壤铵态氮容易被土壤吸附, 且不同土层植被根系对其吸收利用也会对其含量的变化规律产生影响^[25]。

速效钾均值在夏季存在土壤 Apo. 含量在首层与其余层存在显著差异, 土壤 Apo. 含量在春季各层较低于其余季节, 其含量仅在 8.2~38.0 mg/kg, 在春季和夏季随土层深度增加逐渐降低且夏季首层与中层以及底层差异显著, 其差值分别为 53.9, 58.7 mg/kg。土壤速效钾能被植物直接吸收利用的含量一般不超过全钾的 2%^[26]。土壤温度是影响钾素动态变化和土壤供钾能力的一个重要因素, 在夏季温度相对较高的季节, 速效钾含

量较高, 冬、春两季节速效钾含量骤减^[27]。

土壤有效磷在各季节以及土层深度不存在显著差异, 但其含量在各季节首层均高于底层, 在春、夏季其含量随土层深度增加逐渐降低, 在秋、冬季中层含量在各层中最低。夏、秋季含量低于春、冬季节。夏季植物处于生长旺盛时期, 对有效磷需求较大, 春冬季节植物对其需求较小, 而植物根系及相应的微生物会分泌有机酸等物质, 促使有效磷释放, 从而使土壤中有有效磷含量增加^[28-29]。夏季降雨较多, 大雨的冲刷导致其他地方的磷元素在表层汇聚, 土壤磷素向地表水体迁移的途径有横向的地表径流和纵向的淋洗, 一般经渗漏液和侧向渗漏流所携带的磷含量很少, 因为其运移距离很短且迁移速度较慢^[30], 因此土—水之间的磷素交换的主要途径是横向的地表径流, 所以表层土壤有效磷相对较高。

3.3 泥炭湿地土壤各养分之间的相关性分析

利用 Pearson 相关性分析对神农架大九湖亚高山泥炭湿地土壤 TOC、TN、TP、An、Apo、Aph、pH、Eh、指标进行分析(表 2), 结果显示, 土壤 TOC 仅与 TN 呈显著正相关, 相关系数为 0.348, 与容重呈显著负相关、相关系数为 -3.78。与 Apo、pH、呈负相关, 土壤 TN 仅与 TP、An、Apo. 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.602, 0.364, 0.402, 与 Aph、pH 呈正相关, 与 Eh 呈负相关; TP 与 An、Apo. 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.334, 0.57, 与 Aph、温度呈正相关; An 与 Apo. 呈显著正相关, 相关系数为 0.525; Apo. 与 Eh 为显著负相关, 相关系数为 -0.374; Aph. 与各指标相关性较弱; pH 与 Eh 呈显著负相关, 相关性为 0.644。

本研究土壤总有机碳与容重呈显著负相关($P < 0.01$), 该结果与马维伟等^[31]对尕斯库勒湖湿地研究结果一致。研究显示土壤总有机碳含量降低会导致土壤容重增加。土壤总有机碳与总氮呈显著相关可能与土壤中总有机碳大部分来源于湿地植物枯落物以及动物残骸以及微生物作用有关, 有机质的累计与分解对氮含量的具有重要的影响^[32]。

土壤总氮与速效养分均为显著正相关, 由于速效养分为植物较好吸收的养分, 因此其含量变化与植物具有较大的关系, Jobbagy 等^[33]研究显示, 植物根系对土壤养分的分布产生影响。长期厌氧环境造成研究区土壤 pH 呈酸性, 使得土壤处于还原环境, 泥炭藓作为该区域特殊植被, 其具备的单位面积持水量最大失水率低的特性, 其植物体较粗壮, 植株较高且在生长过程中植株上部生长下部死亡, 死亡部分又不易腐烂, 形成疏松多孔结构特征^[34], 对研究区土壤养分的分布特征造成一定的影响。

表 2 大九湖泥炭湿地各土壤指标间相关性分析

指标	TOC	TN	TP	An.	Apo.	Aph.	pH	Eh	容重
TOC	1.000	0.348*	0.018	0.276	-0.105	0.202	-0.224	0.110	-0.378*
TN		1.000	0.602**	0.364*	0.402*	0.309	0.144	-0.222	-0.062
TP			1.000	0.334*	0.570**	0.275	0.003	0.005	-0.028
An.				1.000	0.525**	0.169	0.191	-0.263	-0.015
Apo.					1.000	0.273	0.247	-0.374*	0.098
Aph.						1.000	-0.122	-0.092	-0.141
pH							1.000	-0.644**	-0.116
Eh								1.000	0.049
容重									1.000

注: * 在置信度(双测)为 0.05 时,相关性显著; ** 在置信度(双测)为 0.01 时,相关性显著。

此外有研究^[35]表明,土壤酶活性的高低对土壤碳、氮、磷都具有显著的制约作用,神农架大九湖泥炭湿地作为常年淹水的雨养型湿地,深入其微生物酶活性研究有利于对该研究区土壤养分变化进行深层解释。

3.4 神农架与其他区域泥炭湿地土壤养分的比较

艾比湖、尕海、三江平原、若尔盖湿地均为我国较典型的泥炭湿地,由于地理位置,气候类型、海拔高度、地

形、植被类型等的不同,其土壤养分含量特性均有所差异。神农架大九湖亚高山典型泥炭湿地土壤总有机碳、总氮以及铵态氮含量在各泥炭湿地中较高,土壤总氮、铵态氮含量较高,说明该湿地生态系统氮素供应水平较高,有利于植物生长。土壤总磷含量处于中间水平,有效磷含量较高于其余地区;土壤速效钾含量处于中间水平,明显低于三江平原于艾比湖湿地(表 3)。

表 3 神农架大九湖泥炭湿地与其他研究区域泥炭湿地各养分含量对比

湿地名称	纬度	经度	TOC/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	TP/ (g · kg ⁻¹)	An./ (mg · kg ⁻¹)	Aph./ (mg · kg ⁻¹)	Apo./ (mg · kg ⁻¹)	来源
艾比湖湿地	45°04'N	82°48'E	242.2	—	0.90	28.39*	14.25	115.98	[12]
尕海湿地	34°30'N	102°29'E	300.2	10.37	2.37	71.78*	4.57	30.62	[15]
三江平原	47°35'N	133°31'E	184.0	17.60	1.69	8.77	13.40	210.36	[13,36]
若尔盖湿地	32°20'N	103°30'E	336.1	11.94	1.93	9.94	3.07	25.02	[10,11]
大九湖	31°28'N	110°00'E	419.2	20.13	1.56	67.57	31.33	71.20	本研究

注: * 表示水解氮含量,其包含铵态氮含量。

由表 3 可知,高纬度地区湿地对应的土壤总有机碳含量相对较低,存在随着纬度升高土壤有机碳含量降低的趋势,该现象可能与二氧化碳吸收值受到纬度升高而减少有关,纬度升高致使光照时长和角度都产生相应的变化,从而导致不同区域接收的光量子通量密度减少,同时影响该区域温度、降雨等,造成高纬度地区植物有机碳累计的不利因素增加^[16]。

4 讨论

神农架大九湖亚高山典型泥炭湿地土壤总有机碳、总氮、总磷、有效磷、铵态氮、速效钾、pH、Eh、容重均符合正态分布,土壤总有机碳、总氮、总磷、有效磷和铵态氮、速效钾平均含量为 419.2,20.13,1.56 g/kg 和 31.33,67.57,71.20 mg/kg,土壤 pH、Eh、容重为 5.33,104.4,0.155 g/kg 其中有效磷、速效钾属于中强变异性(0.5<CV≤1);总有机碳、总磷、铵态氮、pH、Eh、容重属于中弱变异性(0.1<CV≤0.5);总氮属于弱变异性(CV≤0.1)。

研究区总有机碳含量在季节以及土层深度变化

上无显著差异,其含量在春季较高于其余季节,土壤总氮在土壤首层(0—15 cm)与中层(15—30 cm)、底层(30—45 cm)存在显著差异,首层土壤含量秋季与其他季节存在显著差异。土壤总磷含量在首层与中、底层存在显著差异,在首层土壤磷含量在夏、冬季与春、秋季存在显著差异,在中层夏季与其余季节存在显著差异。土壤速效养分仅有速效钾存在土层深度变化上的差异,其首层与中底层存在显著差异。

土壤有机碳与总氮、总氮与总磷、总氮与铵态氮以及速效钾、总磷与铵态氮以及速效钾、铵态氮与速效钾呈显著正相关,其相关系数分别为 0.348,0.602,0.364,0.402,0.334,0.570,0.525;总有机碳与土壤容重、有效磷与 Eh、pH 与 Eh 呈显著负相关,其相关系数分别为 -0.378, -0.374, -0.644。

与我国其他泥炭湿地比较,本研究区域内土壤总有机碳、总氮、铵态氮含量高于其他区域,土壤总磷、有效磷以及速效钾含量则处于中间水平,同时研究区土壤总有机碳累计程度随纬度升高而降低。

参考文献:

- [1] Waddington J M, Warner K D, KennedY G W. Cutover peatlands: A persistent source of atmospheric CO₂[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(1): 1-7.
- [2] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向[J]. *湿地科学*, 2003, 1(1): 7-11.
- [3] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 等. 湿地土壤有机质和全氮含量分布特征对比研究: 以向海与科尔沁自然保护区为例[J]. *地理科学*, 2002, 22(2): 232-237.
- [4] Mariano G. Hydrologic balance for a subtropical treatment wetland constructed for nutrient removal[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(3): 315-337.
- [5] 孙志高, 刘景双, 牟晓杰. 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]. *土壤与作物*, 2010, 26(3): 277-282.
- [6] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 193-198.
- [7] 何太蓉, 杨达源, 杨永兴. 三江平原泥炭沼泽土剖面 P、K 养分分布特征及影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2004, 20(1): 29-33.
- [8] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils[J]. *Authors in Soil Science*, 1987, 51: 57-112.
- [9] 杜臻杰, 陈效民, 张佳宝, 等. 不同施肥处理下红壤旱地速效磷时空变化及其影响因子[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(4): 112-115.
- [10] 高俊琴, 雷光春, 李丽, 等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征[J]. *湿地科学*, 2010, 8(4): 327-330.
- [11] 田应兵, 熊明标, 宋光煜. 若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 21-25.
- [12] 王勇辉, 董玉洁, 艾尤尔·亥热提. 艾比湖湿地泥炭土壤养分特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(5): 186-192.
- [13] 孙志高, 刘景双, 陈小兵. 三江平原典型小叶章湿地土壤中硝态氮和铵态氮的空间分布格局[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(3): 66-72.
- [14] 王元峰, 王辉, 马维伟, 等. 尕斯库勒湖湿地泥炭土土壤理化性质[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 118-122.
- [15] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 尕斯库勒湖沼泽化草甸湿地不同地下水土壤理化特征的比较分析[J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 341-347.
- [16] 彭凤姣, 葛继稳, 李艳元, 等. 神农架大九湖泥炭湿地 CO₂ 通量特征及其影响因子[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 453-460.
- [17] 李艳元, 葛继稳, 彭凤姣, 等. 神农架大九湖泥炭湿地 CH₄ 通量特征及其影响因子[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2017, 42(5): 832-842.
- [18] 彭凤姣, 葛继稳, 李永福, 等. 神农架大九湖泥炭湿地水汽通量特征及生态意义[J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(5): 1-8.
- [19] 何报寅, 张穗, 蔡述明. 近 2600 年神农架大九湖泥炭的气候变化记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 109-115.
- [20] 葛继稳. 湿地资源及管理实证研究: 以“千湖之省”湖北省为例[M]. 武汉: 科学出版社, 2007.
- [21] 罗涛, 伦子健, 顾延生, 等. 神农架大九湖湿地植物群落调查与生态保护研究[J]. *湿地科学*, 2015, 13(2): 153-160.
- [22] 黄咸雨, 张志麒, 王红梅. 神农架大九湖泥炭湿地关键带监测进展[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2017, 42(6): 1026-1038.
- [23] 中华人民共和国农业部. NY/T 1849—2010, 酸性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定联合浸提一比色法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 1-16.
- [24] Skiba U, Smith K A, Fowler D. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(11): 1527-1536.
- [25] Bai J H, Deng W, Zhu Y M, et al. Comparative study on the distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in wetlands: A case study of Xianghai and Horqin Nature Reserve[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 232-237.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] Sparks D L, Liebhardt W C. Temperature effects on potassium exchange and selectivity in Delaware soils[J]. *Soil Science*, 1982, 133(1): 10-17.
- [28] 罗先香, 敦萌, 闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 154-160.
- [29] 黄敏, 吴金水, 黄巧云, 等. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 366-370.
- [30] Rowell D L. Agriculture, fertilizers and the environment[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(3): 541-549.
- [31] 马维伟, 王辉, 黄蓉. 尕斯库勒湖湿地生态系统土壤有机碳储量和碳密度分布[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 738-744.
- [32] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Dose conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen: A review of the literature[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 105-123.
- [33] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecology*, 2002, 10(2): 423-436.
- [34] 麻俊虎, 李大华, 彭涛, 等. 独山泥炭藓沼泽湿地五种泥炭藓植物持水特性研究[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(3): 1170-1176.
- [35] 陈立明, 满秀玲. 云冷杉林土壤酶活性与土壤养分的研究[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 94-99.
- [36] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1842-1848.