

陈雨晴,席海洋,程文举,等.荒漠河岸林区3种典型植物群落下土壤碳氮含量特征[J].中国沙漠,2023,43(1):150-159.

荒漠河岸林区3种典型植物群落下 土壤碳氮含量特征

陈雨晴^{1,2}, 席海洋¹, 程文举^{1,2}, 赵欣悦^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:以黑河下游荒漠河岸林区3种典型植物(苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*))群落下的土壤为研究对象,分析了0~280 cm土层土壤碳氮含量特征,运用Pearson相关分析、通径分析方法揭示了土壤碳氮含量与其他理化性质的关系。结果表明:(1)苦豆子、胡杨、柽柳群落下的土壤平均碳含量分别为16.35、20.23、17.23 mg·g⁻¹,平均氮含量分别为0.47、0.69、0.61 mg·g⁻¹,植被类型导致的土壤碳氮含量的差异主要表现在0~10 cm表层。(2)荒漠河岸林区0~160 cm土壤碳储量柽柳(444.64 t·hm⁻²)>胡杨(398.60 t·hm⁻²)>苦豆子(368.95 t·hm⁻²),土壤氮储量柽柳(12.46 t·hm⁻²)>胡杨(11.88 t·hm⁻²)>苦豆子(10.60 t·hm⁻²)。 (3)土壤有机质、总磷、速效磷、碱解氮、速效钾含量及电导率与土壤碳氮含量正相关($P<0.01$),pH、容重与土壤碳氮含量负相关($P<0.01$)。

关键词:总碳;总氮;荒漠河岸带;土壤理化性质;通径分析

文章编号: 1000-694X(2023)01-150-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00116

中图分类号: S153

文献标志码: A

0 引言

土壤碳氮库动态及其机制是全球陆地生态系统研究的核心问题^[1]。全球土壤碳氮更趋向于分布在热带湿润区或者高寒永久冻土区^[2],但占全球陆地面积约50%的干旱半干旱地区的土壤碳氮储量及其对全球气候影响的潜力仍不容忽视^[3]。近年来,干旱半干旱区土壤碳氮含量变化问题引起了部分国内外学者的关注。杨玉海等^[4]研究了塔里木河流域土地利用变化对有机碳储量的影响;Dong等^[5]以禁牧条件下的灌木荒漠土壤为研究对象,揭示了禁牧对土壤碳氮储量的影响;Wang等^[6]研究了中国西北河西走廊荒漠草原的有机碳空间分布格局及其影响因素。干旱半干旱区土壤碳氮含量特征具有空间异质性,且造成这种差异的主导因素也不同。

植被与土壤是陆地生态系统中相互制约、相互影响的统一体。植被从土壤中不断地吸收养分,并以枯落物的形式返还土壤,在不断往复的过程中对

土壤的发育、养分循环等产生重要影响^[7]。在不同植被类型下,植被的特征、组成等差异引起土壤的环境、结构等不同,进而影响土壤养分的输入与消耗^[8-9]。生长在极端干旱环境下的荒漠河岸林为内陆河下游绿洲的主要组成部分^[10],林区内生长的大量乔、灌、草等植被对于极端干旱区防风固沙、遏制沙漠化十分重要^[11]。目前关于干旱区荒漠河岸林研究多围绕植被与地下水关系^[12]及土壤盐分、养分空间异质性^[13-14]等方面,对于荒漠河岸林土壤碳氮分布特征尚未清晰,在一定程度上制约了人们对干旱区土壤碳氮循环过程及其机制的全面认识。基于此,本研究选取了黑河下游河岸林区3种典型植物群落下的土壤为研究对象,揭示土壤总碳、总氮沿土壤深度的变化特征,并分析其与土壤理化因子的关系,为荒漠河岸带生物地球化学循环过程以及土壤碳氮空间格局研究提供参考。

1 研究区概况

黑河下游荒漠河岸林区(40°20'—42°30'N、99°

收稿日期:2022-08-04; 改回日期:2022-09-21

资助项目:中国科学院“西部交叉团队”重点实验室专项(xbzg-zdsys-202103);内蒙古自治区科技重大专项(zdxx2018057)

作者简介:陈雨晴(1997—),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事干旱区水土资源研究。E-mail: chenyuqing@niece.ac.cn

通信作者:席海洋(E-mail: xihy@lzb.ac.cn)

30′—101°45′E)位于内蒙古自治区额济纳旗境内。区内地势起伏小,海拔 1 000 m 左右。属于典型的温带大陆性气候,年平均气温 8.9 ℃,干燥少雨,蒸发量大,年降水量 38.5 mm,年蒸发量 3 500 mm 以上。土壤较为贫瘠,以灰棕荒漠土为主,棕漠土、石膏灰棕漠土等均有分布。特殊的气候与土壤条件导致区内植被以具有抗旱耐盐特征的植物为主。黑河下游的植被可分为两大部分,一部分是分布于戈壁滩的荒漠植被,另一部分则是分布于河道两侧的河岸林,以胡杨(*Populus euphratica*)、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、花花柴(*Karelinia caspia*)等为主要代表植物。

2 数据与方法

2.1 样品采集

黑河下游荒漠河岸林内的乔、灌、草分别以胡杨、多枝怪柳以及苦豆子为优势种^[15]。多枝怪柳占研究区林地面积的 72.3%^[16],胡杨更是河岸林内唯

一的乔木树种,是维持研究区生态系统稳定的关键物种。2021 年 9 月沿垂直黑河下游东河河道方向选择以胡杨、多枝怪柳(简称怪柳)以及苦豆子为优势植被的 3 个样地(图 1),每个样地内设置 3 个重复采样点。采用剖面挖掘采样法对土壤进行分层采样,3 个样地的采样深度以达到地下水面为止,第 1、2 层土壤分别按 0~10、10~40 cm 间隔采样,其余层采样间隔为 40 cm。胡杨、怪柳样地的采样深度为 280 cm,距离河道 50 m 的苦豆子样地附近地下水位较浅,采样深度仅达到 160 cm。采样时,在每一个采样点将每一层的土壤取出后装入已标记的自封袋中,分为两份,一份带回实验室自然风干,过筛(2 mm)备用,另一份 4 ℃下保存备用。另外,每一土层取 2 个环刀样,用于测定土壤含水量及容重。同时记录采样点植被状况、经纬度等基本信息。本次采样共采集 63 份土壤样品,采样点基本情况信息见表 1。

2.2 样品分析

总碳、总氮含量用碳氮分析仪(VELP CN 802)

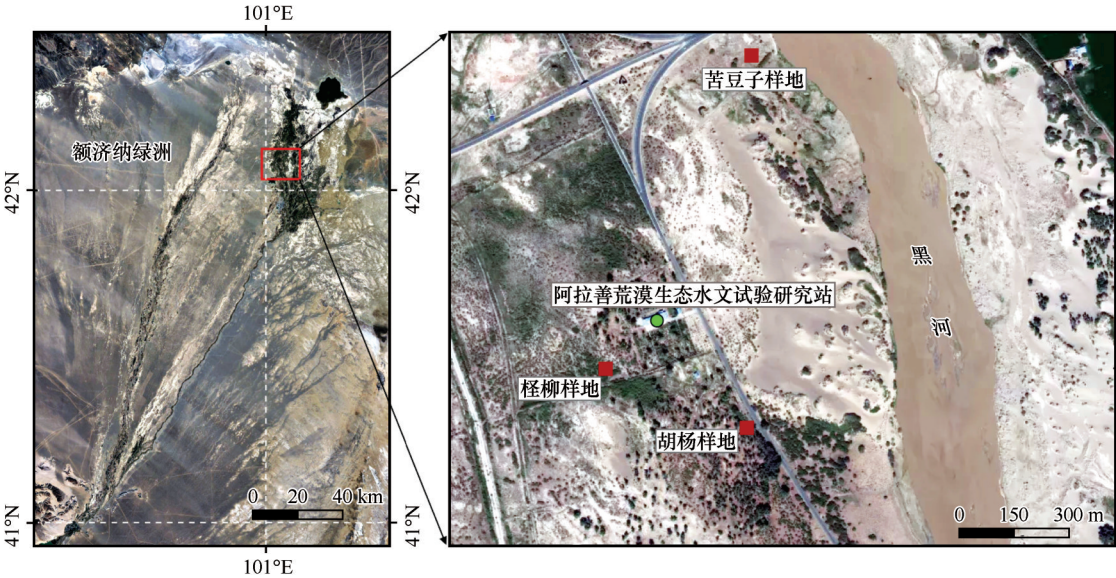


图 1 研究区样地分布
Fig. 1 Sample plot distribution in the study area

表 1 样地植被基本情况

Table 1 Basic situation about the vegetation of the sample land					
样地	与河道距离/m	平均高度/m	平均胸径/cm	平均密度/(株·hm ⁻²)	立地条件
苦豆子	50	0.43	0.57	28 800	草地
胡杨	300	12.10	60.96	283	林间地
怪柳	500	2.20	3.10	1 775	怪柳冠下

测试,土壤含水量用 105 °C 恒温烘干法测定,土壤容重用环刀法测定。pH 与电导率在实验室内分别用 pH 仪(雷磁 PHS-3 C)、电导率仪(雷磁 DDS-307 A)测定,前处理水土混合比例为 5:1,在振荡机摇晃 1 min 后静置,静置 30 min 后取上清液测定。土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,总磷采用钼锑抗比色法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定,速效钾含量采用火焰光度法测定,速效磷含量采用该 NaHCO_3 浸提法测定。

2.3 研究方法

2.3.1 土壤碳氮储量计算

根据下列公式计算土壤总碳储量(S_{TC})和总氮储量(S_{TN}):

$$S_{TC} = TC_i \times BD_i \times D_i \times 0.1 \quad (1)$$

$$S_{TN} = TN_i \times BD_i \times D_i \times 0.1 \quad (2)$$

式中: S_{TC} 和 S_{TN} 分别为第*i*层土壤总碳储量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和总氮储量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); TC_i 和 TN_i 分别为第*i*层土壤碳含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和土壤氮含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); BD_i 为第*i*层土壤密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); D_i 为第*i*层土层厚度(cm);0.1为单位转换系数。

2.3.2 通径分析

通径分析是一种能够定量解释自变量与因变量之间相关关系的方法。该方法计算得到简单相关系数、直接通径系数、间接通径系数以及决策系数用以衡量自变量 x_i ($i=1, 2, \dots, m$)与因变量 y 之间的关系。直接通径系数与间接通径系数之和即为自变量 x_i 与因变量 y 的简单相关系数。决策系数 R^2 通过公式(3)计算得出,它可以反映自变量对因变量的综合作用,当 $R^2>0$ 时,说明 x_i 对 y 起增强作用,当 $R^2<0$ 时,说明 x_i 对 y 起限制作用^[17]。

$$R_i^2 = 2P_{iy}r_{iy} - P_{iy}^2 \quad (3)$$

式中: R_i^2 为自变量 x_i 对因变量 y 的决策系数; P_{iy} 为直接通径系数; r_{iy} 为相关系数。

2.4 数据分析

在 R Studio 中进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、LSD 多重比较以及 Pearson 相关分析并绘图,进行单因素方差分析之前先对数据进行正态性检验与方差齐性检验。运用 Canoco 5.0 进行 RDA 分析与绘图,运用 SPSS 25 进行通径分析,运用 Origin 2017 绘图。

3 结果与分析

3.1 土壤碳氮含量变化特征

苦豆子、胡杨、柽柳样地的土壤平均碳含量分别为 16.35、20.23、17.23 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均氮含量分别为 0.47、0.69、0.61 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 2)。其中,胡杨样地土壤剖面平均氮含量显著高于苦豆子样地($P<0.05$)。从垂直方向上看,苦豆子样地土壤碳氮含量变化幅度较小,碳含量为 15~17 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,氮含量为 0.4~0.6 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高值均出现在 80~120 cm 深度。胡杨样地 0~10 cm 的土壤碳氮含量最高,分别为 48.61、2.48 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,随深度增加,土壤碳、氮含量均呈下降—升高—下降的变化趋势。柽柳样地土壤碳含量约为 5~24 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高值出现在 120~160 cm 深度,土壤氮含量约为 0.4~0.9 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高值出现在 10~40 cm 深度,而后波动降低。总体来看,3 种植被类型下的土壤碳、氮含量随土层深度增加呈现波动下降趋势,表层土壤碳氮含量差异较大,随着深度增加差异变小(图 2)。

表 2 土壤平均碳氮含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 2 Average soil carbon and nitrogen content($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

土壤养分	苦豆子	胡杨	柽柳	平均
碳	16.35±0.13 ^a	20.23±2.36 ^a	17.23±2.64 ^a	17.94±1.66
氮	0.47±0.03 ^b	0.69±0.07 ^a	0.61±0.07 ^{ab}	0.59±0.09

不同小写字母表示不同植被类型之间土壤碳氮含量差异显著($P<0.05$)。

3.2 土壤碳氮储量及其变化特征

苦豆子、胡杨、柽柳样地 0~160 cm 深度土壤碳储量分别为 368.95、398.60、444.64 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮储量分别为 10.60、11.88、12.46 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3)。胡杨、柽柳样地 0~280 cm 深度土壤碳储量分别为 713.42、665.95 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮储量分别为 21.64、22.76 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3 种植被下的土壤碳氮储量随土壤深度的变化趋势与碳氮含量的变化趋势基本一致(图 3)。总体上,0~40 cm 深度土壤碳储量表现为胡杨(148.88 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>苦豆子(85.20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>柽柳(77.75 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$),氮储量表现为胡杨(6.70 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>柽柳(3.42 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>苦豆子(2.51 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$);40~160 cm 深度,土壤碳、氮储量表现为柽柳(366.88、9.04 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>苦豆子(283.74、8.08 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>胡杨(250.23、5.18 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$);160~280 cm 深度,土壤碳储量表现为胡杨(314.82 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>柽柳

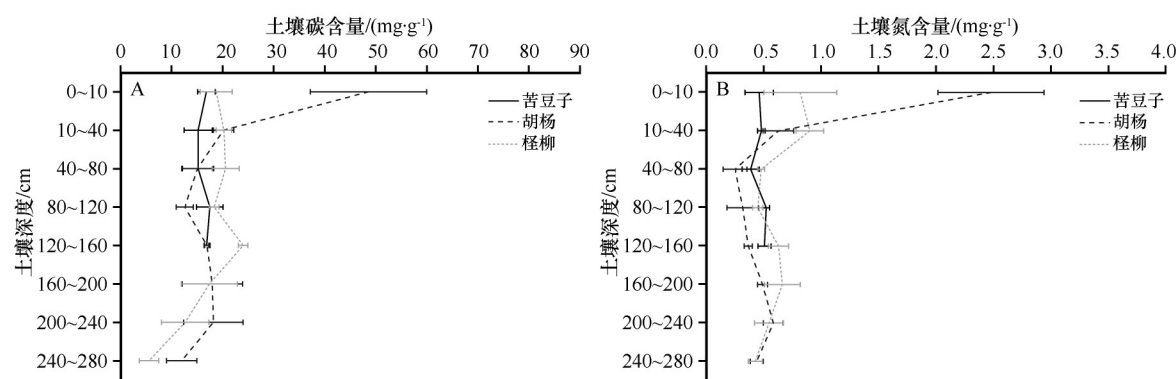


图 2 土壤碳氮含量垂直变化趋势

Fig. 2 Vertical change trend of soil carbon and nitrogen content

表 3 土壤平均碳氮储量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 3 Average soil carbon and nitrogen storage($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

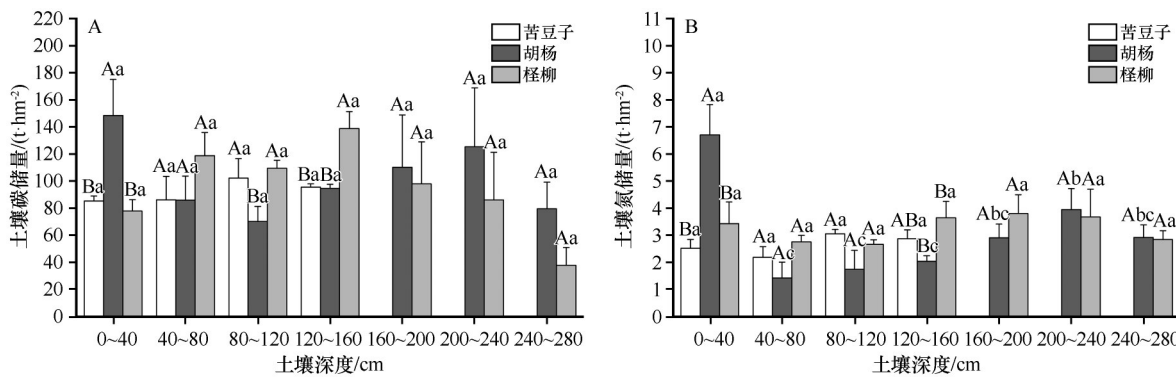
土壤深度 /cm	碳储量			氮储量		
	苦豆子	胡杨	桉柳	苦豆子	胡杨	桉柳
0~160	368.95	398.60	444.64	10.60	11.88	12.46
0~280	—	713.42	665.95	—	21.64	22.76

($221.32\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),土壤氮储量表现为桉柳($10.30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>胡杨($9.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

3.3 土壤理化性质特征

不同植被下土壤理化性质变化特征存在一定差异(图 4)。有机质、速效磷、速效钾、碱解氮 4 项养分成分的“表聚性”特征明显,随着土壤深度增加基本呈现先降低后升高趋势,最高值出现在 0~10 cm

深度的表层土中。另外,胡杨样地土壤表层养分含量明显高于其他两种植被类型下的同层土壤。总磷含量在 3 种土壤深度 160 cm 以上变化不大,在深度 160 cm 以下呈下降趋势。土壤 pH 随土壤深度的变化较小,整体处于 8~10,这说明荒漠河岸林土壤整体偏碱性。电导率是指示土壤盐分的关键指标,由图 4G 可知,0~10 cm 深度的土壤电导率最大,这说明盐分在土壤表层大量聚集,荒漠河岸林土壤表层的盐碱化现象较为严重。距离河道近的苦豆子样地土壤电导率小,而距离河道远的桉柳样地的电导率更大。3 种植被的土壤容重随深度增加均表现出微小的升高趋势。土壤含水量方面,苦豆子样地土壤含水量随深度增加而升高,胡杨、桉柳样地含水量随深度增加先升高后降低。



不同大写字母表示同一土层不同植被之间的差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一植被下不同土层之间差异显著($P<0.05$)

图 3 土壤碳氮储量垂直变化趋势

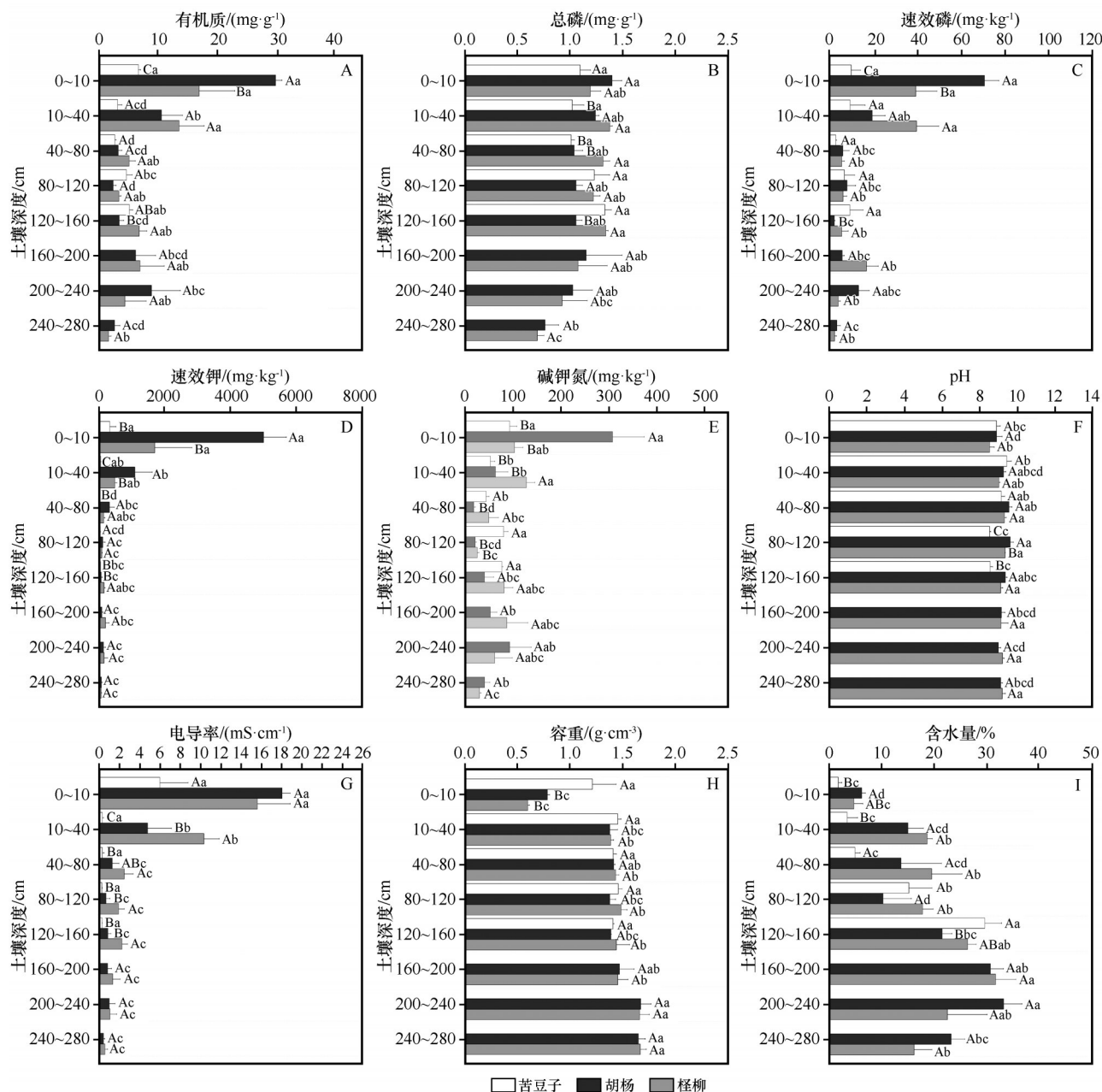
Fig. 3 Vertical change trend of soil carbon and nitrogen storage

3.4 土壤碳氮含量与理化性质的关系

3.4.1 土壤碳氮含量与理化性质相关关系分析

除土壤含水量之外,其余土壤理化指标均与碳氮含量具有显著的相关性(图 5)。其中,电导率及

有机质、总磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量与碳氮含量极显著正相关,pH、土壤容重与碳氮含量显著负相关。土壤含水量与土壤碳氮含量关系不显著。土壤理化性质与土壤碳含量的相关性表现为碱解



不同大写字母表示同一土层不同植被之间的差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一植被下不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 土壤理化性质变化趋势

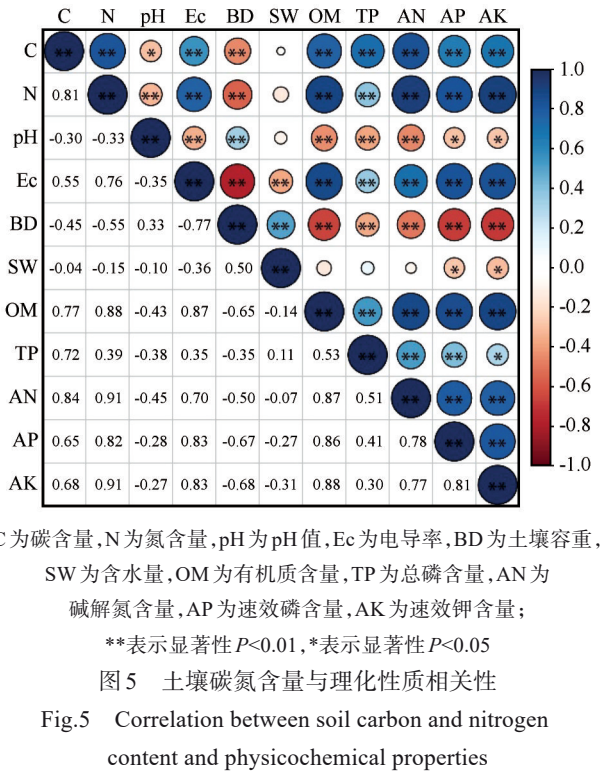
Fig. 4 Trends in soil physicochemical properties

氮含量>有机质含量>总磷含量>速效磷含量>速效钾含量>电导率>土壤容重>pH>土壤含水量, 与氮含量的相关性表现为速效钾含量>碱解氮含量>速效磷含量>有机质含量>电导率>土壤容重>总磷含量>pH>土壤含水量。

3.4.2 土壤碳氮含量与理化性质的通径分析

土壤碳氮含量与理化性质拟合方程均达到极显著水平(表4), 其中, 土壤碳含量的拟合回归方程对其解释量达到82.9%, 氮含量的拟合方程对其解

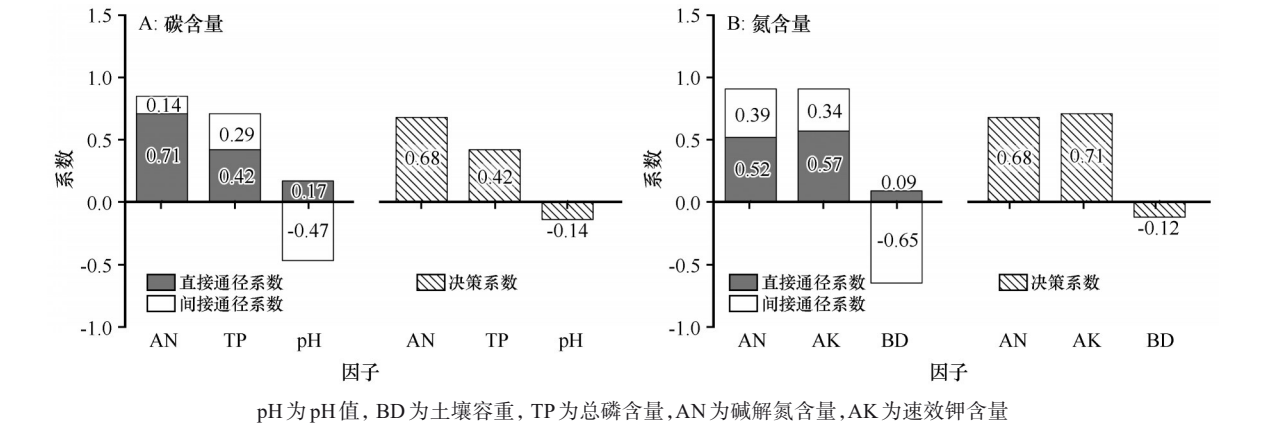
释量达到93.5%, 说明回归方程中的自变量解释了土壤碳氮变化的大部分信息。由图6A可知, 碱解氮对土壤碳含量的直接作用较大, 而pH的直接作用小, pH主要通过影响碱解氮、总磷间接作用于土壤碳含量, 另外值得注意的是, pH的间接负效应大于直接正效应, 因此pH与土壤碳含量表现为负相关关系; 由决策系数结果可知, 碱解氮含量、总磷含量为土壤碳含量的主要决定因子, 而pH为主要限制因子。由图6B可知, 速效钾含量对氮含量的直接



作用最大,容重对氮含量的直接作用较小,而间接
通径系数表现为容重>碱解氮含量>速效钾含量,说
明容重对速效钾、碱解氮的影响大于对土壤氮的直
接影响;由决策系数结果可知,速效钾、碱解氮含量
为土壤碳含量的主要促进因子,而容重为主要制约
因子。

表 4 土壤碳氮含量与理化性质回归方程			
Table 4 Regression equation for soil carbon and nitrogen content and physicochemical properties			
因变量y	回归方程	R^2	P
碳含量 y_C	$y_C = 0.101AN + 17.338TP + 4.809PH - 52.717$	0.829	0.00**
氮含量 y_N	$y_N = 0.0044N + 0.001AK + 0.171BD - 0.022$	0.935	0.00**

pH 为 pH 值, BD 为容重, TP 为总磷含量, AN 为碱解氮含量, AK 为速效钾含量; **表示显著性 $P < 0.01$ 。



4 讨论

4.1 荒漠河岸林区土壤碳氮含量变化规律

本研究发现黑河下游荒漠河岸林土壤碳氮平均含量分别为 17.94、0.59 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 这与 Zhang 等^[11]的研究结果接近, 低于全国平均水平(19.33、1.61 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[18-19]。与干旱区的部分沙地相比^[20-21], 黑河下游荒漠河岸带的土壤具有较高的碳氮含量, 这主要与荒漠河岸带的植被有关。荒漠河岸林生长于河道两侧, 由河水补给的地下水为河岸带内植物生长发育提供了重要的水分保障^[22], 在黑河下游形成了以乔、灌、草为主的荒漠植被带^[23], 成为土壤碳氮输入的主要来源, 相较于其他荒漠生态系统, 荒漠河岸林土壤可能形成干旱区的大型“沃岛”。

本次研究沿垂直河道方向采集了 3 种植被类型下的土壤。从水平方向上比较, 深度 0~10 cm 的土层中, 胡杨样地的碳氮含量显著高于其余两个样地, 而深度 10 cm 以下的土层中, 各样地之间的土壤碳氮含量差异并不明显, 这主要与研究区植被类型差异有关。作为植物与土壤碳氮交换的场所, 表层土壤的碳氮含量与植物碳氮输入量及转化效率有直接关系^[24]。根据之前的研究数据^[25-27]可知, 3 个样地的优势植被类型的叶片碳含量较为相近, 仅多枝桧柳叶片氮含量明显高于其他两种植被类型(表 5)。

表5 主要植物叶片碳氮含量
Table 5 Leaf carbon and nitrogen content of
major vegetation

植物	碳含量/(mg·g ⁻¹)	氮含量/(mg·g ⁻¹)	数据来源
苦豆子	391.4	13.7	[25]
胡杨	435.1	14.9	[26]
多枝怪柳	380.27	30.42	[27]

一方面,胡杨属于干旱区典型落叶乔木,其生物量往往大于灌、草植被^[28],单位面积内为表层土壤提供更多的枝叶凋落物,增加了土壤碳氮输入量;另一方面,地表的凋落物具有调节水分、温度等土壤微气候的作用,进而能够影响土壤微生物活性^[29],因此,胡杨植被的凋落物堆积为表层土壤碳氮转换创造了更好的条件。这种“植物效应”一般在土壤表层或者浅层中表现比较明显,随着土壤深度增加而逐渐减弱,直至某一深度基本消失^[30],这也可以用来解释深度10 cm以下的土层中各样地之间的土壤碳氮含量差异并不明显的现象。

从垂直方向上来看,随土壤深度增加,荒漠河岸林区土壤碳氮含量整体呈现波动下降趋势,0~40 cm深度的碳氮含量与160~280 cm深度相比降幅分别为39.98%、45.42%,说明荒漠河岸带土壤碳氮整体具有“表聚性”,这一变化规律与之前的研究结论相似^[31-32]。但是苦豆子与怪柳样地0~10 cm深度土壤碳氮含量与其下部10~40 cm深度土壤碳氮含量相比,“表聚性”不明显,究其原因可能包括以下几个方面:①表层以下土壤碳氮积累主要来源于根系及其分泌物^[33]。依赖土壤水或地下水生存的干旱区植物,受到水分胁迫影响,根冠比增大^[34]。因此,多枝怪柳及苦豆子的地下根系可能为其表层以下土壤碳氮提供了更多输入量。②研究区位于极端干旱区,大气降水极少,土壤水为依靠毛细管力上升的地下水^[35],土壤含水量基本随深度增加而增加,表层以下的土壤水热条件在一定程度上优于表层,有利于土壤微生物对地下根系分解转化。

4.2 荒漠河岸林区土壤碳氮含量与理化性质关系

土壤碳氮含量是碳氮元素在土壤中积累和消耗平衡的结果,地上凋落物以及地下根系等为重要输入来源,直接影响土壤碳氮积累量^[36-37],土壤水热条件、理化性质等也是影响碳氮积累转化效率的关键因素^[38]。本文对荒漠河岸林土壤碳氮含量与理

化性质进行相关分析显示,电导率、有机质等与土壤碳氮含量均具有显著相关性(图5)。

有机质、总磷、速效磷、碱解氮、速效钾与总碳、总氮均属于土壤的重要物质,它们在迁移与转化过程中往往伴有一定的协同作用,在相关关系上常表现为显著正相关。土壤有机质主要是由动、植物残体分解转化而来,有机质经矿化后可转化为氮、磷等元素,另外,有机质自身较强的吸水能力,能够保持土壤水分,改善土壤环境^[39]。作为植物内部磷脂、核酸、核蛋白等的关键组分,磷元素具有促进植物生长、增加植物生物量的重要作用^[40]。钾元素是植物体内重要的酶活化剂,能够促进植物叶片的光合与呼吸作用,提高植物抗旱能力^[41]。随着土壤中的这些物质增多,植物的生长状态提升,固定碳氮的能力增强,进而影响土壤碳氮输入量以及转化效率。

pH与土壤碳氮含量为显著的负相关关系,这与之前的研究一致^[42]。作为土壤环境关键参数,pH与土壤微生物活性紧密相关。Tang等^[43]认为pH小于5.5或大于8.5时对土壤微生物活性具有抑制作用。本研究区内土壤pH多在8.5~9.5,高碱性环境不利于土壤微生物活动,因此,pH与土壤碳氮呈显著负相关关系。电导率是指示土壤盐分的基础指标,一般研究认为,土壤盐分含量增高会抑制植物生长,进而减少土壤碳氮的输入量,因此,两者之间为负相关关系^[44-45],但是本研究结果显示电导率与土壤碳氮含量之间为正相关关系,这与蒋腊梅等^[46]对干旱区草地土壤的研究结果一致。出现这种现象的原因可能是,与土壤盐分的抑制作用相比,极端干旱区内蒸发强导致的盐分在土壤表层大量积累的空间分布特征对电导率与土壤碳氮相关性的影响更大。容重变化对土壤碳氮含量的影响主要体现在调节土壤中的水、肥、气、热等要素,这一方面可以直接影响土壤微生物的活性,另一方面也可以影响地上植被的生长状况,进而影响土壤碳氮输入与转化^[47-48]。本研究显示土壤容重与碳氮含量呈现显著负相关关系,这与张旭冉等^[49]在克氏针茅草原区的研究结果一致。

5 结论

黑河下游荒漠河岸林区苦豆子、胡杨、怪柳3种植被下的土壤平均碳含量分别为16.35、20.23、17.23 mg·g⁻¹,平均氮含量分别为0.47、0.69、0.61

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤碳氮含量随土壤深度增加整体呈现波动下降趋势。由植被类型导致的土壤碳氮含量差异主要表现在深度0~10 cm表层,随着深度增加,差异逐渐减小。

深层土壤中仍然具有较大的碳氮储量,在今后碳氮研究中不可忽视。苦豆子植被下,0~160 cm深度的土壤碳氮储量分别为 368.95 、 $10.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,胡杨植被下,0~280 cm深度的土壤碳氮储量分别为 713.42 、 $21.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,怪柳植被下,0~280 cm深度的土壤碳氮储量分别为 665.95 、 $22.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

土壤有机质、总磷、速效磷、碱解氮、速效钾含量及电导率与碳氮含量为正相关关系,pH、容重与碳氮含量为负相关关系,土壤含水量与碳氮含量相关性较弱且不显著。碱解氮、总磷、pH为影响总碳的关键因素,碱解氮、速效钾、容重是影响总氮的关键因素,其中,pH与容重主要通过间接效应分别影响土壤碳氮变化的关键因子,碱解氮、速效钾以及土壤容重是影响土壤氮含量的关键因子。

不同土层的土壤碳氮含量与土壤理化因子的相关性不同,有机质、总磷、pH等理化因子对表层或浅层土壤的碳氮含量解释力更高,深层土壤中的碳氮含量可能较为稳定或者受植物地下生物量分配、土壤质地、成土过程等其他因素影响更大。

参考文献:

- [1] Carvalhais N, Forkel M, Khomik M, et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 213–217.
- [2] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, et al. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81–91.
- [3] Li Y, Wang Y G, Houghton R A, et al. Hidden carbon sink beneath desert[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(14): 5880–5887.
- [4] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河干流土地利用/覆被变化对土壤有机碳储量的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2784–2790.
- [5] Dong Y, Sun Z, An S, et al. Community structure and carbon and nitrogen storage of sagebrush desert under grazing exclusion in Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(2): 239–251.
- [6] Wang M, Su Y, Yang X. Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in desert grasslands of the Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Plos One*, 2014, 9(4): e94652.
- [7] 任启文, 毕君, 李联地, 等. 冀北山地3种森林植被恢复类型对土壤质量的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1818–1824.
- [8] 刘帅楠, 李广, 杨传杰, 等. 植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 343–349.
- [9] 濮阳雪华, 王月玲, 赵志杰, 等. 陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究[J]. *草业学报*, 2021, 30(5): 13–24.
- [10] 韩路, 王海珍, 彭杰, 等. 塔里木荒漠河岸林植物群落演替下的土壤理化性质研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2808–2814.
- [11] Zhang X L, Guan T Y, Zhou J H, et al. Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China[J]. *Forests*, 2018, 9(1): 34.
- [12] 席海洋, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游绿洲NDVI对地下水位变化的响应研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 574–582.
- [13] 高进长, 苏永红, 席海洋, 等. 黑河下游河流沿岸土壤养分和盐分的研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 94–98.
- [14] 赵玉, 冯起, 李会亚. 黑河下游土壤盐分分布特征[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 1196–1203.
- [15] 赵雪, 张小由, 李启森, 等. 额济纳绿洲沙漠化对怪柳群落影响的研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 89–94.
- [16] 张华, 张兰, 赵传燕, 等. 黑河下游绿洲植被优势种生物量空间分布及蒸腾耗水估算[J]. *地理科学*, 2014, 34(7): 876–881.
- [17] 刘旻霞, 夏素娟, 穆若兰, 等. 黄土高原中部三种典型绿化植物光合特性的季节变化[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 4098–4109.
- [18] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139–151.
- [19] 刘耀辉, 郑淇元, 文杰, 等. 江西省森林土壤碳氮磷含量及其化学计量比特征分析[J]. *南方林业科学*, 2021, 49(2): 42–46.
- [20] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 科尔沁沙地4种典型灌木灌丛下土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(1): 164–172.
- [21] 薛英龙, 李春越, 王益, 等. 农业利用对毛乌素沙地土壤碳氮含量及微生物量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2325–2335.
- [22] 尹力, 赵良菊, 阮云峰, 等. 黑河下游典型生态系统水分补给源及优势植物水分来源研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1478–1486.
- [23] 李雪娇. 黑河下游极端干旱区胡杨净光合速率日变化及主要影响因子[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [24] 杨乐, 何莹, 李东宾, 等. 旱化对浙江山地沼泽湿地土壤与植物碳氮磷含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1267–1274.
- [25] Molyneux D E, Davies W J. Rooting pattern and water relations of 3 pasture grasses growing in drying soil[J]. *Oecologia*, 1983, 58(2): 220–224.
- [26] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 中国黑河下游荒漠河岸林植物群落水分利用策略研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(4): 693–705.

- [27] 崔东,陈亚宁,李卫红,等.伊犁河谷苦豆子C、N、P含量变化及化学计量特征[J].生态学报,2018,38(17):6163–6170.
- [28] Malik A, Kumar A, Singh R P. Application of heuristic approaches for prediction of hydrological drought using multi-scalar streamflow drought index [J]. Water Resources Management, 2019, 33(11):3985–4006.
- [29] 贾培龙,安韶山,李程程,等.黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J].水土保持学报,2020,34(1):315–321.
- [30] Applying A P, Bernhardt E S, Stanford J A. Floodplain biogeochemical mosaics: a multidimensional view of alluvial soils[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2014, 119(8):1538–1553.
- [31] Li D F, Gao G Y, Lu Y H, et al. Multi-scale variability of soil carbon and nitrogen in the middle reaches of the Heihe River basin, northwestern China[J]. Catena, 2016, 137:328–339.
- [32] 高丽娟,吕光辉,王芸,等.艾比湖地区盐生植物群落土壤氮素的垂直分布特征[J].干旱区研究,2014,31(1):51–56.
- [33] Pierret A, Maeght J L, Clement C, et al. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research[J]. Annals of Botany, 2016, 118(4):621–635.
- [34] 曹生奎,冯起,司建华,等.荒漠河岸林胡杨养分状况研究[J].中国沙漠,2011,31(5):1131–1140.
- [35] 张晓龙,周继华,来利明,等.荒漠河岸多枝怪柳灌丛碳氮磷化学计量特征及其影响因素[J].环境科学研究,2021,34(3):698–706.
- [36] Imada S, Taniguchi T, Acharya K, et al. Vertical distribution of fine roots of *Tamarix ramosissima* in an arid region of southern Nevada[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 92:46–52.
- [37] 许安妮,王宸,陈润苟,等.四川龙溪-虹口常绿阔叶林凋落物与土壤碳、氮、磷化学计量特征分析[J].中国农业科技导报, 2019, 21(4):158–167.
- [38] 任玉连,陆梅,曹乾斌,等.南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征[J].北京林业大学学报,2019,41(11):104–115.
- [39] 王发刚,王启基,王文颖,等.土壤有机碳研究进展[J].草业科学,2008(2):48–54.
- [40] 张雨瑶,李世友.土壤磷与植物关系研究进展[J].世界林业研究,2013,26(5):19–24.
- [41] 冯锦,崔东,孙国军,等.新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J].草业科学,2017,34(4):692–697.
- [42] 刁二龙,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同土地利用方式下土壤碳氮含量及通径分析[J].干旱区研究,2021,38(5):1346–1354.
- [43] Tang J, Liang S, Li Z, et al. Effect of freeze-thaw cycles on carbon stocks of saline-alkali paddy soil[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, 62(12):1640–1653.
- [44] 王燕,赵哈林,董治宝,等.荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤环境的演变过程[J].生态环境学报,2014,23(11):1744–1751.
- [45] 张立华,陈小兵.盐碱地怪柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2015,26(3):653–658.
- [46] 蒋腊梅,杨晓东,杨建军,等.不同管理模式对干旱区草地土壤有机碳氮库的影响及其影响因素探究[J].草业学报,2018,27(12):22–33.
- [47] 张青青,张桂莲,伍海兵,等.城市森林土壤有机碳密度及影响因子变化研究[J].生态科学,2022,41(2):204–210.
- [48] 阎欣,安慧,刘任涛.荒漠草原沙漠化对土壤物理和化学特性的影响[J].土壤,2019,51(5):1006–1012.
- [49] 张旭冉,张卫青,乌日查呼,等.克氏针茅草原区有机碳与土壤理化性质的关系[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):194–199.

Characteristics of soil carbon and nitrogen change in three typical plant communities in desert riparian forest area

Chen Yuqing^{1,2}, Xi Haiyang¹, Cheng Wenju^{1,2}, Zhao Xinyue^{1,2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Taking the soils under the 3 vegetation types of desert riparian forest in the lower reaches of the Heihe River as the research object, the variation characteristics of soil carbon and nitrogen from 0–280 cm were analyzed by means of field sampling and laboratory analysis. Pearson correlation analysis and path analysis methods were used to reveal the relationship between soil carbon, nitrogen and physicochemical properties. The results showed that: (1) The average soil carbon content under the planting covers of *Sophora alopecuroides*, *Populus euphratica*, *Tamarix ramosissima* was 16.35, 20.23, 17.23 mg·g⁻¹, respectively, and the average nitrogen content was 0.47, 0.69, 0.61 mg·g⁻¹, respectively. The difference in soil carbon and nitrogen content due to vegetation type was mainly manifested in the surface layer of 0–10 cm. (2) Soil carbon storage in the desert riparian forest area of 0–160 cm was shown as *Tamarix ramosissima* (444.64 t·hm⁻²) > *Populus euphratica* (398.60 t·hm⁻²) > *Sophora alopecuroides* (368.95 t·hm⁻²), and soil nitrogen storage was *Tamarix ramosissima* (12.46 t·hm⁻²) > *Populus euphratica* (11.88 t·hm⁻²) > *Sophora alopecuroides* (10.60 t·hm⁻²). (3) The correlation analysis between soil carbon and nitrogen content and physical and chemical properties showed that organic matter, total phosphorus, available phosphorus, alkaline nitrogen, available potassium, conductivity and carbon and nitrogen content were positively correlated ($P < 0.01$), and pH, bulk weight and carbon and nitrogen content were negatively correlated ($P < 0.01$). The results of this study can provide a reference for the study of the spatial pattern of carbon and nitrogen in the desert riparian zone in arid areas.

Key words: total carbon; total nitrogen; desert riparian forests; soil physicochemical properties; path analysis