

黄土高原不同植被带草本植物叶片与土壤碳氮分布特征

李冬冬^{1,2}, 方昭^{1,2}, 杜好田³, 姚静³, 焦峰^{3,4*}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 4 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】黄土高原植被受水热因子作用明显, 植被分布自东南向西北总体呈现出森林向草原过渡的地带性规律。本研究选取黄土丘陵区从南向北形成的4种典型植被带(森林带、森林-草原带、草原带和草原-荒漠带)作为研究对象, 探讨不同植被带草本植物叶片与土壤碳(C)、氮(N)的分布差异及影响因素, 为预测黄土高原植物的生长发育前景、生态系统的植物营养元素和土壤养分状况提供理论依据。【方法】以陕北黄土丘陵区富县、甘泉县、安塞县、靖边县、横山县以及榆林市榆阳区为研究区域, 基于野外取样调查和室内分析相结合的方法, 分别测定研究区4种植被带草本植物叶片和不同土层碳氮含量, 最后利用方差分析研究不同植被带草本植物叶片及土壤碳氮差异, 并与全球、中国尺度等研究结果进行比较; 同时采用相关分析, 阐明4种植被带植物叶片和不同土层有机碳、全氮的相关关系。【结果】1) 土壤有机碳和全氮含量在0—10、10—20、20—40 cm各个土层中均表现出极显著的相关性($P < 0.001$), 在0—40 cm土层中, 随着深度增加, 土壤有机碳和全氮整体呈下降趋势, 由高到低依次为森林带、森林-草原带、草原带、草原-荒漠带, 但不同植被类型的垂直变化规律差异较大。2) 草本植物叶片有机碳和全氮含量存在显著的相关关系($P < 0.01$), 植物叶片碳含量平均值为442.9 g/kg, 略低于全球492种陆地植物叶片碳含量的平均值464.2 g/kg; 而氮含量平均值为25.8 g/kg, 略高于全球水平20.6 g/kg, 说明黄土高原4种植被带在碳氮积累上存在差异, 且该地区草本植物的C:N相对较低。3) 植物叶片C、N、C:N与土壤SOC、STN含量表现出较为显著的相关关系($P < 0.05$), 总体来看与不同土层相关关系各不相同。【结论】不同植被带土壤C、N空间分布具有一致性, 且C、N含量均存在一定的相关关系。黄土高原由南向北, 呈现植物叶片C含量降低而N含量升高的趋势, 因此C/N呈现减小趋势。植物叶片C、N、C/N与不同土层的土壤C、N均存在一定相关关系。

关键词:黄土高原; 不同植被带; 有机碳; 全氮; 分布格局

Distribution characteristics of carbon and nitrogen in herbaceous plants leaves and soil of different vegetation belts in the Loess Plateau

LI Dong-dong^{1,2}, FANG Zhao^{1,2}, DU Hao-tian³, YAO Jing³, JIAO Feng^{3,4*}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shanxi 712100, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China; 4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【Objectives】The vegetation in the Loess Plateau is strongly affected by hydrothermal conditions. The distribution of vegetation from the southeast to the northwest shows a zonal distribution pattern of transition from forest to grassland. Four typical vegetation belts (forest belt, forest-grass belt, grassland belt and grassland-desert belt) from the south to the north of the Loess Hilly Region were selected as the research subject to study the distribution characteristics of carbon and nitrogen in herbaceous plant leaves and soil of different vegetation belts. The results could provide a theoretical basis for predicting the growth and development of plants,

收稿日期: 2018-04-23 接受日期: 2018-08-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600801); 科技基础性工作专项(2014FY210130)资助。

联系方式: 李冬冬 E-mail: lidongdong173@mails.ucas.edu.cn; *通信作者 焦峰 E-mail: Jiaof@ms.iswc.ac.cn

plant nutrition and soil nutrient status of the ecosystem in the Loess Plateau. **【Methods】** Fuxian County, Ganquan County, Ansai County, Jingbian County, Hengshan County, and Yuyang District of Yulin City were selected as the study areas. They are located in the loess hilly areas of Northern Shaanxi. Field sampling from four vegetation belts and laboratory analysis were conducted. The carbon and nitrogen contents of herbaceous leaves and different soil layers were measured. Finally, the differences in leaf and soil carbon and nitrogen of herbaceous plants in different vegetation belts were analyzed using variance analysis. The results were compared with global and Chinese-scale studies. In addition, four kinds of analysis were used to clarify the four species. Correlations were established between organic carbon and total nitrogen in plant leaves and different soil layers in different vegetation belts. **【Results】** 1) The soil organic carbon and total nitrogen contents showed significant correlations in all soil layers of 0–10, 10–20, 20–40 cm ($P < 0.001$). In the 0–40 cm soil layer, soil organic carbon and total nitrogen contents decreased with depth. From high to low, soil organic carbon and total nitrogen contents were forest zone > forest–grass zone > grass zone > grassland–desert zone, but the vertical variation of different vegetation types varied greatly. 2) There was a significant correlation between organic carbon content and total nitrogen content in leaves of herbaceous plants ($P < 0.01$). The mean C content in leaves was 442.9 g/kg, which was slightly lower than the mean of 492 species of terrestrial plants which was 464.2 g/kg. The average leaf N content was 25.8 g/kg, slightly higher than the global mean of 20.6 g/kg, indicating a difference in leaf nitrogen accumulation and low herb C:N in the area. 3) Leaf C and N contents were significantly correlated with SOC and STN contents ($P < 0.05$). But the relationship with different soil layers was different. **【Conclusions】** The spatial distribution of soil C and N in different vegetation belts was consistent, and there was a correlation between C and N contents. From the south to the north of the Loess Plateau, plant leaf C content decreased, while leaf N content increased, resulting in C:N showed a decreasing trend. There was a correlation between leaf C, N, C:N and soil C and N of different soil layers.

Key words: Loess Plateau; different vegetation zone; organic carbon; total nitrogen; distribution pattern

土壤和植被是陆地生态系统的重要组成部分，二者相互作用、密不可分。叶片作为植物获取资源的同化器官，也是植物重要的养分储存器官，在生态系统结构、动态及养分指示等方面也发挥着重要作用^[1]。一般而言，植物群落通过叶片光合作用产物向地下的分配(根系分泌、细胞凋亡和根系分解)及地上凋落物的输入等方式参与土壤碳(C)、氮(N)循环过程^[2]。有机碳和氮素是土壤养分的重要组成部分和植物赖以生存的物质基础，它们的含量和分布不仅与土壤肥力及植物营养的生物有效性相关，同时也影响着植物自身的生产力，因此土壤C、N等养分含量常被作为衡量土壤肥力持久性的重要指标。

陆地生态系统碳氮循环作为重要的物质循环过程，决定着未来陆地生物圈表现为碳源与碳汇的发展方向，在预测和减缓全球气候变化方面扮演着重要角色。关于土壤有机质和全氮分布格局和关系研究已经深入到了高原、山地、草甸、湿地、农用地、森林等各种土地类型。迄今国内外关于土壤碳氮要素的空间分布特征及其影响因素的研究较多^[3-4]，多数研究表明，碳氮平衡受植被类型、土壤性质和

气候等因素调控，其中，植被类型差异会直接影响土壤有机碳和全氮的输入和输出过程，进而导致土壤碳氮含量及分布格局的差异，碳氮分布格局已成为陆地生态系统养分循环研究的热点和重点问题之一^[5-6]。对于全球及区域尺度上植物叶片碳氮分布格局，国内研究主要集中在森林生态系统^[7-8]、草地生态系统^[9-10]、湿地生态系统^[11]等方面。目前，在黄土丘陵区，关于土壤碳氮的研究主要集中在不同植被恢复类型^[12]、土地利用方式^[13]和地形因子^[14]对土壤碳氮空间格局的影响方面。黄土高原丘陵区沟壑纵横，地形复杂，植被类型多样，从南到北因水热条件差异依次形成了森林植被区、森林草原植被区、草原植被区、沙区植被区和荒漠植被区景观特征，土壤碳氮养分特征在不同植被类型间差异较大^[15]。因此积极开展不同植被带草本植被与区域生境土壤碳氮平衡动态研究，对于揭示当地土壤养分供给能力和植物对营养元素的吸收利用能力，以及植物对环境的适应与反馈能力等都具有重要的意义^[7, 16-17]。本试验通过系统地研究黄土丘陵区4种典型植被带土壤及植物叶片有机碳、全氮分布特征及其相关性，

对于揭示不同区域生态条件下植物营养元素、土壤养分状况及生态植被恢复的指导与实践工作具有重要现实意义。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区位于陕西省北部黄土高原腹地的富县、甘泉县、安塞县、靖边县、横山县以及榆林市榆阳区境内($107.97^{\circ}\sim109.87^{\circ}$ E, $35.95^{\circ}\sim38.36^{\circ}$ N)(图1), 海拔 $1085\sim1553$ m, 属于暖温带半干旱气候区。多年平均降水量 503.3 mm, 年均气温 8.8 °C, 干燥度为 $1.5\sim2.5$, 日照时数 2395.6 h, 无霜期 157 d。地貌类型为典型丘陵沟壑区, 土壤以黄绵土、绵沙土和风沙土为主, 抗蚀抗冲性差, 土壤侵蚀和水土流失现象较为严重。植被自东南向西北依次分布着暖温带落叶阔叶林带南部亚地带和北部亚地带, 与温带草原地带的森林草原、典型草原和荒漠草原3个亚地带, 此外, 还有很小一部分伸入到荒漠地带^[15]。黄土高原地区主要存在4种主要的植被类型组合: 森林带、森林-草原带、典型草原带、草原-荒漠带。研究区植被(表1)以禾本科(*Poaceae*)、菊科(*Asteraceae*)以及豆科(*Leguminosae*)植物为优势植物, 主要有长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿(*Ariemisia gmelinii*)、沙蒿(*Ariemisia desertorum*)、猪毛蒿(*Ariemisia scoparia*)、凤毛菊(*Saussurea amurensis*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设及植被调查 于2012年8月中旬进行野外采样工作, 在研究区内共布设15块 $20\text{ m}\times20\text{ m}$ 大小的样地, 每种植被带类型下分别设置 $3\sim4$ 块样地。每块样地内选取6个 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 的样方进行植物群落特征调查, 对样方内所有草本植物的种类、高度和频数进行统计。同时采集样地中的地带性草本植物用于植物叶片有机碳、全氮含量的测定。

1.2.2 植物样品有机碳、全氮测定方法 将每一个样地采集的植物样品经研磨后过100目网筛(孔径为 0.15 mm), 经过 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后, 用全自动凯氏定氮仪(ATN-300)测定植物全氮。植物有机碳采用外加热、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 热容量法测定。草本植物的叶片有机碳、全氮含量以单位质量的养分含量表示。

1.2.3 土壤样品采集及测定方法 每个样地按“S”形采集土壤样品, 去除土层上枯落物, 用土钻按 $0\text{-}10$ 、 $10\text{-}20$ 、 $20\text{-}40$ cm分层采集土样, 将

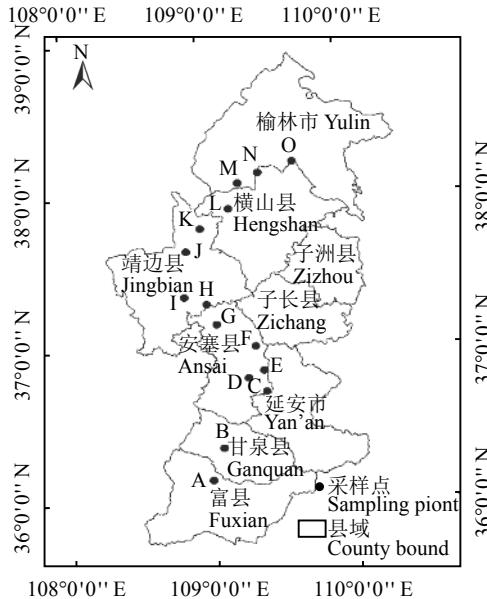


图1 研究区样点分布示意图

Fig. 1 Hint map of sample location

5个样点土样按层混合均匀, 密封后带回实验室。土壤样品自然风干后, 仔细除去细根、砾石等杂物后研磨过 0.15 mm网筛进行元素分析, 野外设置3个重复。土壤有机碳采用重铬酸钾热容量法测定, 土壤全氮用凯氏定氮法测定, 凯氏定氮仪型号ATN-300, 具体测定方法均参照参考文献^[18]。

1.3 气象数据采集

从国家气象局获取陕西省各县1990—2010年的气象资料, 然后采用全球定位系统获取各个样地坐标, 根据样地坐标使用ArcGIS软件采用Kriging插值法^[19]提取各样地近20年年均温(MAT/°C)和年降水量(MAP/mm)数据并计算其20年平均值。

1.4 数据处理

在进行数据分析之前, 对各类数据进行正态分布检验(单个样本K-S检验), 检验结果表明以上数据均符合正态分布。采用SPSS 22.0软件对不同植被带植物叶片和不同土层土壤有机碳、全氮含量及碳氮比进行单因素方差分析; 并将所有样地土壤碳氮以及植物叶片碳氮之间进行相关分析和回归关系。最后采用Origin9.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被带草本植物土壤碳氮含量特征

如图2所示, 0—10, 10—20和20—40 cm分3个土层土壤有机碳含量分布规律均为: 森林带>森林-草原带>草原带>草原带-荒漠带。在0—10 cm

表 1 调查样地基本情况
Table 1 Basic information of the experimental plots

植被带 Vegetation zones	样地 Site	纬度 Latitude	物种数量 Species No.	年均温 MAT(℃)	年降雨量 MAP(mm)	土壤类型 Soil type	主要草本植物 Main herbaceous species
森林带 Forest zone	A	36.0	13	9.11	633	I	长芒草、茜草、芦苇、蒲公英 <i>Stipabungeana, Rubia cordifolia,</i> <i>Phragmites australis, Taraxacum mongolicum</i>
	B	36.2	11	8.99	595	I	长芒草、香青兰、败酱、芦苇 <i>Stipabungeana, Dracocephalum moldavica,</i> <i>Patrinia scabiosaeifolia, Phragmites australis</i>
	C	36.4	12	8.74	579	I	长芒草、达乌里胡枝子、蒲公英、角蒿 <i>Stipabungeana, Lespedeza davurica,</i> <i>Taraxacum mongolicum, Incarvillea sinensis</i>
	D	36.7	10	8.63	553	I	长芒草、达乌里胡枝子、蒲公英、芦苇 <i>Stipabungeana, Lespedeza davurica,</i> <i>Taraxacum mongolicum, Phragmites australis</i>
森林-草原带 Forest-grass zone	E	36.9	9	8.41	481	I	长芒草、黄花草木樨、铁杆蒿 <i>Stipabungeana, Melilotus officinalis</i> <i>Artemisia gmelinii</i>
	F	36.9	7	8.22	483	I	长芒草、黄花草木樨、风毛菊 <i>Stipabungeana, Melilotus officinalis,</i> <i>Saussurea amurensis</i>
	G	37.0	11	7.94	467	I	达乌里胡枝、铁杆蒿子、鬼针草 <i>Lespedeza davurica, Artemisia gmelinii,</i> <i>Bidens pilosa</i>
	H	37.2	8	7.38	446	II	铁杆蒿、芦苇、长芒草、阿尔泰狗娃花 <i>Artemisia gmelinii, Phragmites australis,</i> <i>Stipabungeana, Heteropappus altaicus</i>
草原带 Grass zone	I	37.3	13	6.93	428	II	长芒草、茵陈蒿、香青兰、达乌里胡枝子 <i>Stipabungeana, Artemisia capillaris,</i> <i>Dracocephalum moldavica, Lespedeza davurica</i>
	J	37.5	7	6.88	411	II	长芒草、达乌里胡枝子、沙蒿、拐轴鸦葱 <i>Stipabungeana, Lespedeza davurica,</i> <i>Artemisia desertorum, Scorzonera divaricata</i>
	K	37.7	7	6.79	404	II	远志、牻牛儿苗科、香青兰、野豌豆 <i>Polygala tenuifolia, Erodium stephanianum,</i> <i>Dracocephalum moldavica, Vicia sepium</i>
	L	37.8	12	6.61	392	II	黑沙蒿、长芒草、狗尾草、猪毛蒿 <i>Artemisia ordosica, Stipabungeana,</i> <i>Setaria viridis, Artemisia scoparia</i>
草原-荒漠带 Grass-desert zone	M	38.0	6	6.50	384	III	沙蒿、阿尔泰狗娃花、猪毛蒿 <i>Artemisia desertorum, Heteropappus altaicus,</i> <i>Artemisia scoparia</i>
	N	38.1	6	6.34	351	III	沙蒿、猪毛蒿、沙打旺 <i>Artemisia desertorum, Artemisia scoparia,</i> <i>Astragalus adsurgens</i>
	O	38.4	6	6.12	332	III	沙蒿、猪毛蒿、达乌里胡枝子 <i>Artemisia desertorum, Artemisia scoparia,</i> <i>Lespedeza davurica</i>

注 (Note) : MAT—Mean annual temperature, MAP—Mean annual precipitation; I—黄绵土 Loessial soil, II—绵沙土 Loess sandy soil, III—风沙土 Aeolian sandy soil.

土层, 森林带和森林-草原带土壤有机碳含量明显高于其他 2 种植被带 ($P < 0.05$); 4 种植被带土壤有机碳

含量在 10—20 cm 土层无明显差异 ($P < 0.05$); 草原-荒漠带 20—40 cm 土层有机碳含量与森林带差异显

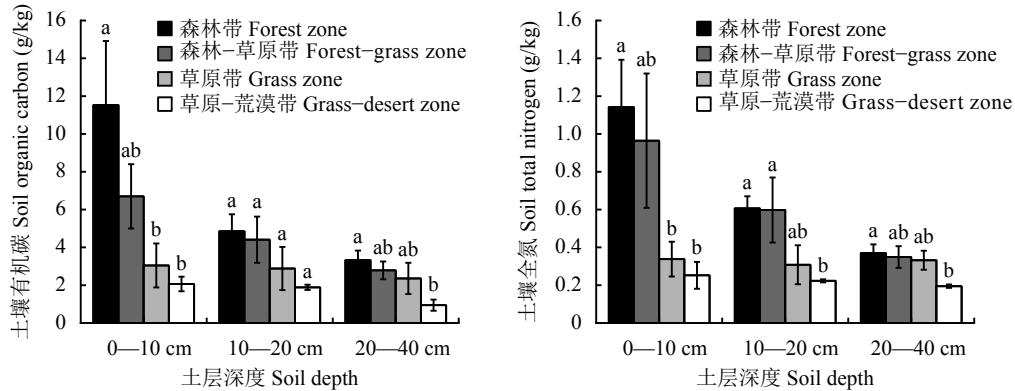


图 2 不同植被带土壤有机碳、全氮垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in different vegetation zones

著 ($P < 0.05$)。从图 2 中还可以看出, 4 种植被带土壤有机碳均随土层深度的增加而减少, 其中森林带和森林草原带土壤有机碳变化幅度最大, 这说明森林带和森林-草原带土壤有机质主要分布于浅表层; 而草原带和草原-荒漠带变化幅度较小, 说明草原带和草原-荒漠带土壤有机质在各层分布较为均匀。不同植被带土壤全氮含量在相同土层的分布规律与土壤有机质大致相同, 其中在 10—20 cm 土层草原-荒漠带土壤全氮含量明显低于其他 3 种植被带 ($P < 0.05$), 表现出与有机质不同的分布差异。由此可见, 不同植被类型下土壤有机碳、全氮含量均随土层的增加呈现逐渐下降的趋势, 但下降幅度存在差异。

2.2 不同植被带草本植物叶片碳氮含量

图 3 结果表明, 叶片中 C 的含量表现为森林-草原带 (493.1 g/kg)、森林带 (469.7 g/kg) > 草原带 (430.0 g/kg) > 草原-荒漠带 (357.0 g/kg), 变异系数为 12.0%。而氮在森林带、森林-草原带、草原带和草原-荒漠带叶片中的含量分别为 20.4、25.2、27.1

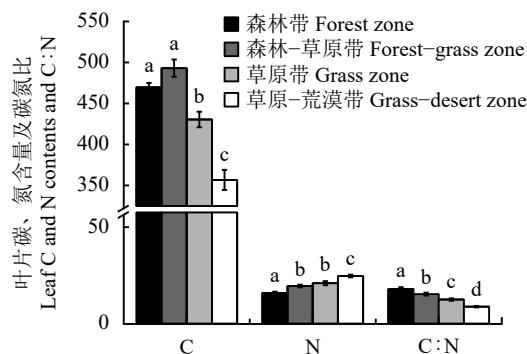


图 3 草本植物叶片碳、氮含量 (g/kg) 及碳氮比

Fig. 3 Herbaceous plant leaf carbon and nitrogen contents (g/kg) and carbon/nitrogen ratio in different vegetation zones

和 32.0 g/kg, 依次呈现出递增的趋势, 变异系数为 17.1%。4 种植被带草本植物叶片 C:N 比值的大小顺序分别为森林带 (23.1)、森林-草原带 (19.7)、草原带 (16.0) 和草原-荒漠带 (11.2), 依次呈现出递减的趋势, 且变异系数为 26.4%, 差异性显著 ($P < 0.05$)。三者的平均值分别为碳含量 443.0 g/kg, 氮含量 25.8 g/kg, C:N 的比值为 17.9。

2.3 不同植被带草本植物叶片及土壤分配特征

土壤碳氮比值 (C:N) 是衡量土壤碳、氮营养平衡状况的指标, 对土壤碳、氮循环有重要影响。从图 4 可以看出, 该区不同植被类型 0—10 cm 和 10—20 cm 的土壤 C:N 变化不大, 不同区域较为一致, 但在 20—40 cm 深度土壤表现出显著差异 ($P < 0.05$)。除草原-荒漠带的土壤 C:N 明显小于其他植被类型外, 其他植被类型差异不大。0—10 cm 层次不同植被类型土壤 C:N 比值的顺序为森林带 > 草原-荒漠带 > 森林-草原带≈草原带。10—20 cm 层次不同植被类型土壤 C:N 比值的顺序为草原带 > 草原-荒漠带 > 森林带 > 森林-草原带。20—40 cm 层

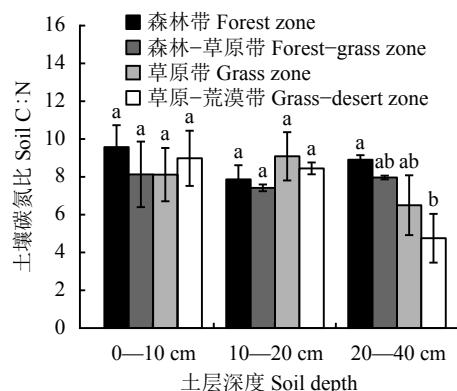


图 4 不同土层土壤碳氮比

Fig. 4 Soil C:N ratio in different layers

次不同植被类型土壤 C:N 比值的顺序为森林带 > 森林-草原带 > 草原带 > 草原-荒漠带，其中森林带 (8.90) 比草原-荒漠带 (4.75) 高了将近一倍。20 cm 以上层次，草原-荒漠带土壤 C:N 略微降低，且随深度变化不大，但在 20—40 cm 土层中土壤 C:N 显著降低，表现出显著性差异 ($P < 0.05$)。由图 5 可知，叶片及土壤碳氮分配比中的 C:C 比值差异不明显 ($P < 0.05$)；叶片-土壤碳氮分配比中的 N:N 比值以森林带 (31.9) 最小，草原-荒漠带 (149.2) 最大，且表现出显著性差异 ($P < 0.05$)。

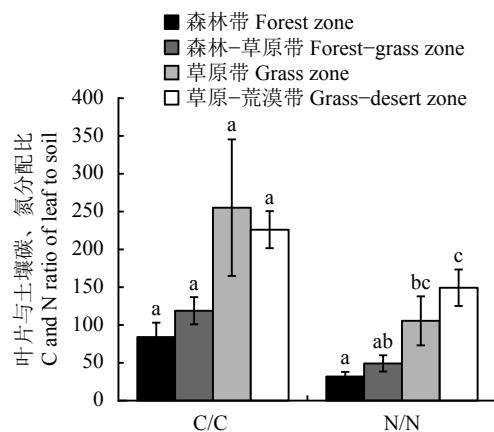


图 5 叶片、土壤的碳、氮分配比

Fig. 5 The carbon and nitrogen ratio of leaf to soil

2.4 不同植被带草本植物叶片碳氮含量与土壤碳、氮养分含量的相关性

将植物叶片 C、N、C:N 分别与 0—10、10—20、20—40 cm 土壤有机质、全氮含量做相关分析，研究植物叶片和土壤 C、N 化学计量特征的关系（表 2）。

从总体来看，叶片 C、N、C:N 与不同土层的土壤 SOC、STN 含量均存在一定的相关关系；相比叶片 C:N 与土壤 SOC、STN 含量之间显著的相关性而言，植物叶片 C、N 与土壤 SOC、STN 含量之间的相关性较弱。其中，叶片 C 含量与各个土层的

SOC、STN 含量均存在显著的相关关系 ($P < 0.05$)，尤其是叶片 C 含量与 10—20 cm 的 STN 存在极显著的相关关系 ($P < 0.01$)；叶片 N 含量与各个土层的 SOC、STN 含量均存在显著的负相关关系 ($P < 0.05$)，尤其是叶片 N 含量与 20—40 cm 的 SOC 存在极显著的负相关关系 ($P < 0.01$)；叶片 C:N 比与各个土层的 SOC、STN 含量均存在极显著的相关关系 ($P < 0.01$)。草本植物叶片及土壤有机碳和全氮相关性分析结果（图 6）也表明，叶片有机碳和全氮含量存在显著的相关关系 ($P < 0.01$)；土壤有机碳和全氮含量之间呈正相关，而且 3 个土层中均表现出极显著的相关性 ($P < 0.001$)。

3 讨论

3.1 不同植被带土壤碳氮分布对植被类型的响应

土壤碳主要取决于土壤有机质含量和凋落物的分解，土壤氮主要来源于凋落物合成的有机质以及大气沉降^[20]。土壤有机碳不仅能够敏感反映全球气候变化，而且是植物和土壤微生物生命活动的养分来源^[21-22]。本研究表明，4 种植被带土壤有机碳含量均存在显著差异 ($P < 0.01$)，具体表现为森林带 (6.57 g/kg) 最高，其次为森林-草原带 (4.63 g/kg)，草原带 (2.76 g/kg) 和草原-荒漠带 (1.63 g/kg) 相对较低（图 2），这可能与不同植被带所处生境条件有关。一般来说，森林带通常具有较高的生产力、凋落物多且分解周期相对较长，更加利于土壤有机碳的积累。多数研究表明，植物和气候条件是影响土壤 C、N 含量垂直分布的主要因素^[23]。本试验结果表明，随着土层深度增加，土壤有机碳含量整体上呈现降低趋势；不同植被带土壤有机碳垂直分布存在明显差异。森林带和森林-草原带土壤有机碳含量随土层的加深呈显著递减趋势，主要是由于土壤表层存在大量凋落物且草本植物根系多分布于表层，从而导致表层土壤有机碳含量显著高于深层土层；相

表 2 植物叶片碳氮计量比与不同土层土壤碳、氮的相关关系

Table 2 Correlation between leaf stoichiometry characteristics and soil C, N in the different soil layers

指标 Index	土壤有机碳 Soil organic C (SOC)			土壤全氮 Soil total N (STN)		
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
C	0.567*	0.653*	0.685*	0.671*	0.710**	0.675*
N	-0.668*	-0.691*	-0.757**	-0.648*	-0.696*	-0.630*
C:N	0.749**	0.777**	0.791**	0.771**	0.784**	0.746**

注 (Note) : *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$ 。

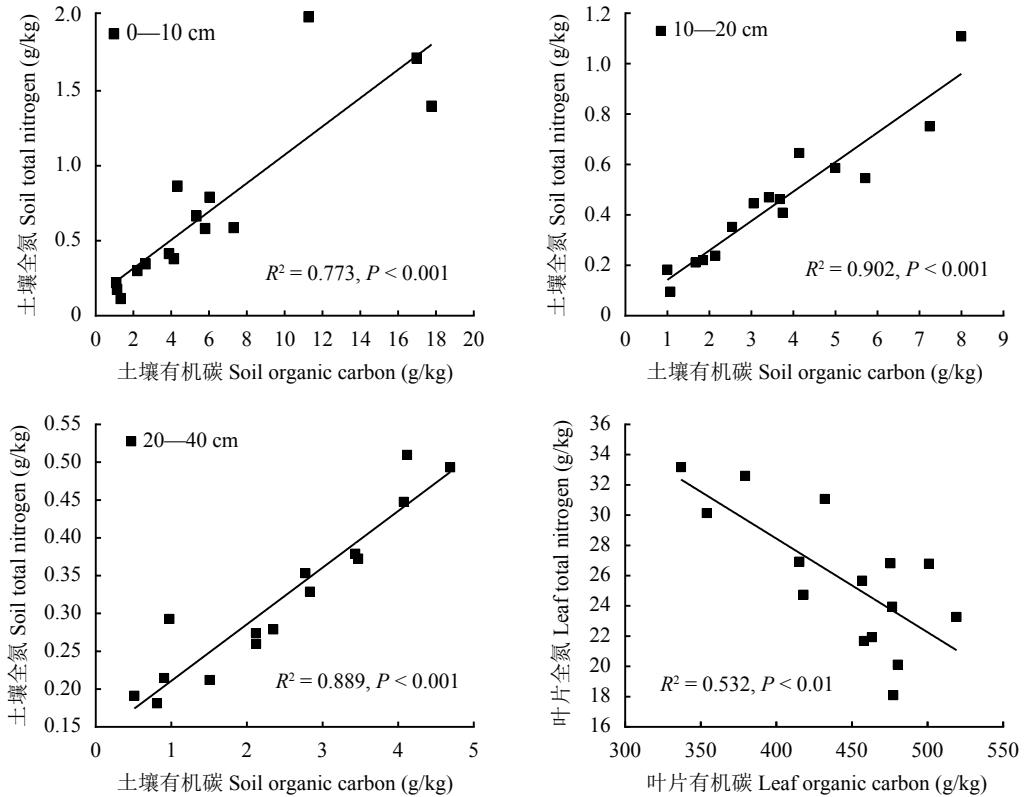


图 6 草本植物叶片及土壤有机碳和全氮相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of organic carbon and total nitrogen for herbaceous plant leaves and soil

比之下, 草原带和草原-荒漠带土壤有机碳含量垂直变异程度较小(图2), 地表的枯落物较少, 主要来源于地上植物茎叶和根系。4种植被类型土壤全氮含量垂直分布表现为随土层深度增加而下降, 这与土壤有机碳随土层加深呈下降变化趋势相类似, 其中在10—20 cm土层草原-荒漠带土壤全氮含量明显低于其他3种植被带($P < 0.01$), 表现出与有机质不同的分布差异。土壤有机碳和全氮主要与生物因素有关, 且两者之间存在良好的耦合关系, 对环境因子的响应变化一般总是同步的, 两者的空间分布具有一致性^[24], 本文研究结果很好地验证了这一规律。

3.2 不同植被带草本植物叶片碳氮分布对植物类型的响应

碳、氮等元素是植物生长发育所必需的营养元素, 在调节植物生长及行为过程中发挥着重要的作用^[25]。叶片是植物与环境进行能量和物质交换最为频繁的器官之一, 对环境变化较为敏感^[26], 在一定程度上可以反映陆地生态系统植被碳氮的转化和积累动态^[9]。不同植被类型植物吸收养分的种类、数量以及对养分的利用效率均存在差异。本研究中4种植被带草本植物叶片碳氮含量存在显著差异($P < 0.05$), 叶片C含量表现为森林-草原带最高, 其次为森林

带、草原带, 草原-荒漠带最低; 叶片氮含量表现为草原-荒漠带含量最高, 而森林带含量最低; 而叶片C:N比值从森林带到草原-荒漠带依次呈现出递减的趋势。本研究区域从温暖湿润的森林植被带过渡到降雨稀少的草原-荒漠带, 水热因子差异明显。一般来说, 草本植物为了适应干旱的气候环境, 会提高自身富含碳的组织比例来应对逆境环境, 以保护植物体不受损伤; 而Reich等^[27]研究发现草本植物氮含量会随温度的降低而呈现上升趋势, Reich等人的温度-植物生理假说很好地解释了这一规律。由于草本植物叶片碳含量随温度的升高而升高, 而氮含量随之降低, 引起草本植物的C:N也随之升高, 这与Reich等研究结果相一致。水分因子作为植物生长的必须要素之一, 降雨量的年际变化必然会引起草本植物碳、氮含量及其化学计量比的差异。黄土高原草本植物叶片氮含量较高, 与土壤养分、年降水量和年均温等均有很大关系。草本植物通常吸收可直接利用的高流动性矿物氮(如硝态氮和铵态氮)来增加体内各器官氮浓度。位于中国西北部的黄土高原, 属典型的温带气候, 水热因子的影响增加了氮的矿化速率, 从而增加草本植物叶片中的氮含量^[10]。

另外, 本研究将黄土丘陵区草本植物叶片碳氮

含量与中国尺度乃至全球尺度进行比较发现, 4种植被带草本植物叶片碳含量平均值为442.9 g/kg, 略低于全球492种陆地植物叶片碳含量的几何平均数(464.2 g/kg)^[28]和我国东部南北样带森林102种优势种叶片的C含量(480.1 g/kg)^[8], 而与郑淑霞等对黄土高原植物叶片碳含量的研究结果基本一致^[10], 在全球尺度范围, 黄土高原地区草本植物叶片的有机化合物含量相对较低。其中森林带草本植物叶片碳含量值为470.0 g/kg, 森林-草原带草本植物叶片碳含量值为493.0 g/kg, 均高于我国黄土高原植被叶片碳平均含量(438.0 g/kg)^[10]和阿拉善荒漠的典型植物(379.0 g/kg)^[29]。4种植被带草本植物叶片氮含量平均值为25.8 g/kg, 略高于全球水平20.6 g/kg^[27]、我国植物叶片氮的平均含量20.2 g/kg^[30]以及阿拉善荒漠区55种典型植物叶片氮含量10.6 g/kg^[29]。

3.3 不同植被带土壤碳氮比与叶片碳氮比分配特征及相关性

碳氮比被认为是土壤氮矿化能力的重要指标, 土壤有机质模型CENTURY就是根据碳氮比来决定有机质分解过程中是发生矿化还是微生物固持, 较低的碳氮比有利于氮的矿化养分释放, 通常认为土壤碳氮比在25~30以下会出现净矿化^[31]。土壤C:N比值既是衡量土壤C、N营养平衡状况的指标, 也可以显示土壤养分利用效率情况, 会影响土壤碳氮循环^[11]。本研究结果显示: 0—10 cm与10—20 cm的土壤C:N的空间变异性相对较低, 20—40 cm土壤C:N空间变异性较大($P < 0.05$)(图4)。这是由于随着土壤深度的增加, 土壤有机质含量趋于稳定, 而大气氮沉降和有机质矿化作用使土壤N含量在一定范围内增加, 从而使两者比值发生较大变化。本研究中, 土壤有机碳和全氮之间呈正相关, 且各个土层达到极显著水平($P < 0.001$)(图5)。作为重要的生理指标, 植物叶片中C:N比值不仅可以反映植物氮元素的利用效率, 还可以代表植物吸收单元同化碳元素的能力, 具有一定的生态学意义^[15]。本研究表明, 森林带植物叶片C:N的比值为23.1(图3), 小于浙江天童的C:N的比值(28.0)^[32]和珠江三角洲典型常绿阔叶林的C:N的比值(45.6)^[33], 说明在小区域尺度上的不同植被类型变异性较大。相比全球尺度, 黄土高原草本植物叶片碳含量较低, 而氮含量较高, 导致黄土高原草本植物叶片C:N低于全球尺度水平。

土壤为植物正常生长、发育和繁殖等生理活动提供所必需的C、N营养元素, 在植物生理过程中

发挥着极其重要的作用; 植物体内的C、N化学计量特征等, 均会受到土壤养分元素含量的影响^[34]; 同时, 植物以枯落物的形式将其归还土壤, 形成生态系统的物质循环和能量流动过程, 不同植被带植物叶片碳氮含量与土壤中碳氮含量存在一定的相关关系, 与本文研究结果相一致(表2)。本研究表明, 4种不同植被带的叶片与土壤C:C的值差异不显著, N:N的值依次递增, 存在显著的差异性($P < 0.05$)(图5)。黄土高原不同植被类型草本植物叶片C、N含量之所以与土壤C、N含量表现出较为显著的关系, 主要是由于草本植物吸收养分的种类、数量以及对养分的利用效率均存在差异, 养分供应与需求之间达到相对平衡的比例, 从而维持草本植物正常的生理活动。

4 结论

黄土高原4种植被带土壤C、N含量由南到北呈现出森林带>森林-草原带>草原带>草原-荒漠带的分布规律, 其中在10—20 cm土层草原-荒漠带土壤全氮含量明显低于其他3种植被带($P < 0.05$), 表现出与有机质不同的分布差异; 同一植被类型下土壤C、N含量随土层深度增加而显著降低, 土壤C、N含量在空间分布上具有一致性。草本植物叶片C、N含量在不同植被类型间差异显著, 由南向北随着植被类型变化草本植物叶片碳含量先升高再降低; 而叶片氮含量表现为逐渐升高, 引起植物叶片C:N呈现下降趋势。植物叶片与土壤碳氮含量具有良好的相关性, 其中4种不同植被带草本植物叶片C、N含量与土壤C、N呈现出较为显著的相关关系($P < 0.05$), 植物叶片C:N与不同土层的土壤C、N含量呈现出显著相关关系($P < 0.01$)。

参 考 文 献:

- [1] 张珍明, 黄冬福, 张家春, 等. 梵净山冷杉与珙桐产地土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 北方园艺, 2016, (6): 138—163.
Zhang Z M, Huang D F, Zhang J C, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus distribution in the Abies in the Fanjing Mountain[J]. Northern Horticulture, 2016, (6): 138—163.
- [2] 艾锐, 张国盛, 李中杰, 等. 滇中不同植物群落对紫色土表层土壤碳、氮累积的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 123—128.
Ai R, Zhang G S, Li Z J, et al. Effects of different plant communities on carbon and nitrogen accumulation in surface soil of purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 123—128.
- [3] 陶吉兴, 傅伟军, 姜培坤, 等. 基于Moran's I和地统计学的浙江森林土壤有机碳空间分布研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 97—101.
Tao J X, Fu W J, Jiang P K, et al. Using Moran's I and geostatistics to

- analyze the spatial distribution of organic carbon in forest soil of Zhejiang Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(5): 97–101.
- [4] 马黄群, 胡玉福, 徐柱, 等. 运用地统计学的土壤有机碳含量空间分布研究[J]. 地理空间信息, 2012, 10(3): 75–77, 80.
Ma H Q, Hu Y F, Xu Z, et al. Spatial distribution of soil organic carbon content using geostatistics[J]. Geospatial Information, 2012, 10(3): 75–77, 80.
- [5] 耿增超, 姜林, 李珊珊, 等. 祁连山中段土壤有机碳和氮素的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 665–672.
Geng Z C, Jiang L, Li S S, et al. Cross-sectional distribution of soil organic carbon and nitrogen in Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 665–672.
- [6] Soosaar K, Mander Ü, Maddison M, et al. Dynamics of gaseous nitrogen and carbon fluxes in riparian alder forests[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(1): 40–53.
- [7] 朱丽, 赵明, 李广宇, 等. 祁连山东段青海云杉林C:N:P化学计量特征[J]. 中国水土保持, 2015, (8): 56–59, 77.
Zhu L, Zhao M, Li G Y, et al. Chemical characteristics of C:N:P in Qinghai Picea forest in the eastern Qilian Mountains[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015, (8): 56–59, 77.
- [8] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 等. 中国东部南北样带森林生态系统102个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 581–586.
Ren S J, Yu G R, Jiang C M, et al. Statistical characteristics of carbon nitrogen and phosphorus stoichiometry in leaves of 102 dominant forest ecosystems in the north-south transect of eastern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 581–586.
- [9] He J S, Wang L, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes[J]. Oecologia, 2008, 155(2): 301–310.
- [10] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. 自然科学进展, 2006, (8): 965–973.
Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial distribution pattern of plant nutrient composition in Loess Plateau[J]. Advances in Natural Science, 2006, (8): 965–973.
- [11] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1407–1414.
Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, et al. Temporal and spatial variability of soil carbon and nitrogen ratio in the corn zone of Songnen Plain[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2011, 32(5): 1407–1414.
- [12] 王小利, 郭胜利, 马玉红, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1281–1285.
Wang X L, Guo S L, Ma Y H, et al. Effects of land use on soil organic carbon and total nitrogen in small watershed in loess hilly area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1281–1285.
- [13] 安韶山, 黄懿梅, 郑粉莉. 宁夏黄土区不同植物群落土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 300–307.
An S S, Huang Y M, Zheng F L. Effects of land use patterns of different plant communities on soil quality in the loess region of Ningxia[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(2): 300–307.
- [14] 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2879–2884.
Wei X R, Shao M A, Gao J L. Relationship between soil organic carbon and environmental factors in small watersheds of gully region in the Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2008, 29(10): 2879–2884.
- [15] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870–879.
Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Latitude variation characteristics of soil properties and ecological stoichiometry in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 870–879.
- [16] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤C、N、P的化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5760–5767.
Li C J, Lei J Q, Xu X W, et al. Stoichiometric characteristics of artificial vegetation and soil C, N and P in the hinterland of Taklamakan Desert[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 33(18): 5760–5767.
- [17] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, (6): 141–153.
Zeng D H, Chen G S. Ecochemometrics: Exploration of the mysteries of complex life systems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, (6): 141–153.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [19] 王艳妮, 谢金梅, 郭祥. ArcGIS中的地统计克里格插值法及其应用[J]. 软件导刊, 2008, (12): 36–38.
Wang Y N, Xie J M, Guo X. Application of geostatistical Kriging interpolation method in ArcGIS[J]. Software Guide, 2008, (12): 36–38.
- [20] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Li B, Yang C, Lin P. Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [21] 王清奎, 汪思龙, 高洪, 等. 土地利用方式对土壤有机质的影响[J]. 生态学杂志, 2005, (4): 360–363.
Wang Q K, Wang S L, Gao H, et al. Effect of land use on soil organic matter[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, (4): 360–363.
- [22] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境, 2003, (4): 500–504.
Zhang J B, Song C C. Sensitivity evaluation index of impact of land use on soil carbon pool[J]. Ecology and Environment, 2003, (4): 500–504.
- [23] Yang Y H, Mohammat A, Feng J M, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China[J]. Biogeochemistry, 2007, 84(2): 131–141.
- [24] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235–252.
- [25] 马永跃, 王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的C、N、P含量及其生态化学计量比[J]. 亚热带农业研究, 2011, 7(3): 182–187.

- [25] Ma Y Y, Wang W Q. Contents of C, N and P in paddy soils and plants in the estuary of the Minjiang River and their ecological stoichiometric ratios[J]. Subtropical Agriculture Research, 2011, 7(3): 182–187.
- [26] Vendramini F, Sandra D, Diegote G, et al. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in flora with succulent species[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 147–157.
- [27] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001–11006.
- [28] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578–580.
- [29] 张珂, 何明珠, 李新荣, 等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6538–6547.
Zhang K, He M Z, Li X R, et al. Stoichiometric characteristics of C, N and P in leaf of typical plants in the Alashan desert region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6538–6547.
- [30] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168: 377–385.
- [31] Prescott N J, Lees M M, Winter R M, et al. Identification of susceptibility loci for nonsyndromic cleft lip with or without cleft palate in a two-stage genome scan of affected sib-pairs[J]. *Human Genetics*, 2000, 106(3): 345–350.
- [32] 黄建军, 王希华. 浙江天童32种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, (1): 92–97.
Huang J J, Wang X H. Nutritional and structural characteristics of 32 evergreen broad-leaved leaves from Tiantong, Zhejiang[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science Edition)*, 2003, (1): 92–97.
- [33] 萧江华, 吴统贵, 陈勇, 等. 珠江三角洲3种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 58–63.
Xiao J H, Wu T G, Chen Y, et al. Leaf eco-chemometrics of three typical forest types in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 58–63.
- [34] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 134–139.
Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, et al. Eco-stoichiometric characteristics of carbon nitrogen and phosphorus in living-leaves-soil of estuarine wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 134–139.