

DOI: 10.11766/trxb202003240513

周 红, 何 欢, 肖 蒙, 何忠俊. 云南省森林土壤腐殖质组分特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 1008–1017.

ZHOU Hong, HE Huan, XIAO Meng, HE Zhongjun. Composition of Humus in Forest Soils of Yunnan Province, China and Its Influencing Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 1008–1017.

云南省森林土壤腐殖质组分特征及影响因素^{*}

周 红¹, 何 欢², 肖 蒙³, 何忠俊^{1†}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘 要: 云南省森林生态系统在全球碳循环及平衡中具有不可替代的作用, 但其森林土壤腐殖质组分特征及其影响因素尚不十分清楚。基于云南省不同林区采集的 88 个表层土样, 通过描述性统计和回归分析量化了海拔、土壤类型、坡向和坡度、年均温和年降水量对土壤腐殖质组分分布影响的相对重要性, 探讨云南省森林土壤腐殖质组分分布特征。结果表明: 云南省森林土壤表层有机碳含量为 8.40~199.73 g·kg⁻¹, 平均含量为 51.37 g·kg⁻¹, 土壤可提取腐殖质碳含量为 2.54~84.02 g·kg⁻¹, 平均含量为 24.52 g·kg⁻¹; 胡富比均值小于 1, 土壤腐殖质聚合度较低; 土壤腐殖质组分分布特征总体表现为滇西北、滇东北部较高, 滇中、滇南部较低; 土壤类型、海拔、年均温是影响云南省森林土壤腐殖质组分含量的主导因子, 各因素的贡献程度总体呈现为土壤类型最高, 其次是年均温、海拔, 这说明土壤类型对森林表层土壤腐殖质的积累起重要作用。

关键词: 云南省; 森林土壤; 腐殖质组分; 分布; 影响因素

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A

Composition of Humus in Forest Soils of Yunnan Province, China and Its Influencing Factors

ZHOU Hong¹, HE Huan², XIAO Meng³, HE Zhongjun^{1†}

(1. College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083; 3. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: 【Objective】Yunnan Province is rich in forest resources, thus posing an important part of China's forest carbon pool. Its forest ecosystem plays an irreplaceable role in the global carbon cycle and balance, and its organic carbon pool in the forest soil does too in regulating the global carbon balance and slowing down the rising concentration of atmospheric chamber gas. Though soil humus is known to be the main body of soil carbon, it is still unclear as to characteristics of its composition and

^{*} 云南省教育厅科学研究基金项目 (2019Y0108)、云南省科技厅自然科学基金面上项目 (2006D0039M) 和云南省第四次森林资源规划设计调查-森林土壤专业调查 (00000000038-407) 资助 Supported by the Science Research Fund Project of Yunnan Provincial Department of Education (No. 2019Y0108), Natural Science Foundation Item of Yunnan Provincial Science and Technology Department (No. 2006D0039M) and The Fourth Survey of Forest Management Inventory in Yunnan Province-Forest Soil Survey (No. 00000000038-407)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hezhongjun@hotmail.com

作者简介: 周 红 (1996—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事森林土壤腐殖质研究。E-mail: 1554101399@qq.com.

收稿日期: 2020-03-04; 收到修改稿日期: 2020-07-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-10-19

influencing factors. Therefore, it is of great significance to strengthen the study of composition of the forest soil humus and its influencing factors to the efforts of regulating forest soil carbon balance and improving soil fertility. **【Method】** A total of 88 soil samples were collected from the topsoil layers of different forest zones in Yunnan province. Environmental factors of the sampling sites, such as soil type, latitude and longitude, elevation, slope degree and slope aspect, were measured through field investigations. The soil samples were analyzed in lab for contents of soil carbon and soil humus and its components, of which regression analysis and descriptive statistics were employed to quantify relative contributions of elevation, soil type, slope degree, slope aspect, annual mean precipitation and annual mean temperature to the variation of soil humus composition. In the end, soil humus composition and distribution in the forest soils of Yunnan were characterized. **【Result】** Results show: in the top soils of the forests, SOC content varied in the range from 8.40 to 199.73 g·kg⁻¹, with a mean of 51.37 g·kg⁻¹; HE-C content in the range from 2.54 to 84.02 g·kg⁻¹, with a mean of 24.52 g·kg⁻¹; HA-C content in the range from 0.99 to 33.64 g·kg⁻¹, with a mean of 9.35 g·kg⁻¹; FA-C content in the range from 1.40 to 57.16 g·kg⁻¹, with a mean of 15.17 g·kg⁻¹; and H/F in the range from 0.17 to 4.59, with a mean of 0.78; soil humus in the samples was fairly low in polymerization degree, with C/N ranging from 4.68 to 41.72 and averaged to be 14.25. The contributions of soil type, elevation and annual mean temperature to soil humus composition were significant ($P < 0.01$ or 0.05), but those of annual precipitation, slope degree and slope aspect were not so significant ($P < 0.05$). The environmental factors varied in explanation of the spatial variation of total organic carbon, extractable humic carbon, humic acid carbon, fulvic acid carbon, and carbon-nitrogen ratio in the soil with soil type explaining 30.1%, 29.6%, 30.9%, 24.3% and 11.5%; annual mean temperature doing 22.2%, 19.5%, 13.7%, 18.8% and 18.0%; elevation doing 13.3%, 9.4%, 11.1%, 8.7% and 13.9%, respectively. **【Conclusion】** The content of soil organic carbon in the forest soils of Yunnan is found to be relatively high in the northeast and northwest parts of the province, and relatively low in the south and central parts. Soil type, elevation and average mean temperature are the key factors regulating spatial variability of the soil humus in the forests of Yunnan Province. In terms of contribution degree, the factors exhibit an order of soil type > annual mean temperature > elevation. Soil type plays an important role in the accumulation of humus in the forest surface soil.

Key words: Yunnan Province; Forest soils; Humus composition; Distribution; Influencing factors

土壤腐殖质作为有机质的主体,是土壤肥力的标志,其中所含的多种疏水基、亲水基和游离基官能团可促进土壤良好结构的形成^[1]。腐殖质被认为是土壤中稳定的有机碳组分^[2],其含量、组成受到多种因素共同影响。森林土壤有机碳库作为全球碳循环的重要组成部分,在调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用^[3]。因此,加强森林土壤腐殖质组成及影响因素研究,对于调控森林土壤碳平衡、提高土壤肥力等方面具有重要意义。目前,国内外开展了大量关于森林土壤有机碳的研究。杜虎等^[4]对广西主要森林土壤有机碳储量及影响因素研究发现,土层深度、经纬度、海拔是影响森林土壤有机碳的主要因子;王艳丽等^[5]研究得出海拔、土层是影响青海省森林土壤有机碳密度的关键因子;黄一敏等^[6]得出影响中国西南喀斯特地区森林土壤有机碳含量和密度的主要因素有土壤容重、地形、海拔、C/N;除海拔、气候条件(温度与降水)外,植被类型、根系分布和密度、凋落物

数量和质量均是影响土壤有机碳的因素^[7-8]。目前国内学者主要集中于对森林土壤有机碳含量及影响因素的研究,关于森林土壤腐殖质影响因素相关问题,尚未进行系统研究。而腐殖质作为有机碳的主体,森林生态系统条件下其组分分布规律是否与有机碳一致?影响有机碳的因素是否以相同方式影响着土壤腐殖化过程?这些问题均亟待解决。因此,搞清不同类型森林土壤腐殖质分布特征,探讨森林土壤腐殖质分布规律与影响因素间关系对维持森林生态系统稳定性具有积极意义。

云南省森林资源丰富,是我国森林碳库的重要组成部分,其森林生态系统在全球碳循环及平衡中具有不可替代的作用^[9],但其森林土壤腐殖质组分特征及影响因素尚不十分清楚。因此,本文以云南省主要林区为研究区域,选取砖红壤、赤红壤、红壤、黄棕壤、黄壤、暗棕壤、棕壤、紫色土、高山草甸土等主要土壤类型为研究对象,分析云南省森林土壤腐殖质分布特征,进而对土壤腐殖质影响因

素进行探讨, 以期在省域尺度下森林土壤腐殖质碳的研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省位于 $97^{\circ}31'39'' \sim 106^{\circ}11'47''\text{E}$, $21^{\circ}8'32'' \sim 29^{\circ}15'8''\text{N}$, 平均海拔 2 000 m 左右, 全省涵盖了多个气候带, 其中以亚热带高原季风气候为主。干、湿季分明而年温差较小, 属低纬高原。云南省的森林植被在复杂的气候条件和地形地貌的共同作用下, 形成了复杂多样的自然特色。云南森林土壤种类繁多, 主要包括高山草甸土、漂灰土、暗棕壤、棕壤、黄棕壤、红壤、赤红壤、砖红壤, 各类土壤呈不规则的带状分布。云南也是我国森林植被类型最丰富的区域, 全境从南到北发育着包括雨林、季雨林的热带森林和包括季风常绿阔叶林、半湿润常绿阔叶林、暖热性针叶林、暖性针叶林的亚热带森林。随着海拔的升高, 还分布着温性针叶林、寒温性针叶林、灌丛草甸和高山苔原植被。

1.2 样品采集与分析

本研究土样采集工作于 2016 年 4 月完成, 在云南省范围内预先进行森林土壤类型调查, 选择各地州市典型土壤类型进行采集, 样方大小设置为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, 记录样地的经纬度、海拔、坡度、坡向、林型、母质等, 每个样方内采用对角线五点混合采样法, 去掉表面枯枝落物, 取表层土壤放于袋内带回实验室, 共采集 88 份土样。自然风干后剔除动植物残体和石块, 四分法取出部分土壤样品、过 0.25 mm 筛备用。采样点分布图详见图 1。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定; 土壤腐殖质采用腐殖质分组修改法测定^[10](土壤腐殖质各组分含量远远高于水溶物及水浮物含量, 且本研究主要关注土壤腐殖质碳各组分含量, 因此文中土壤腐殖质各组分含量包括水溶物及水浮物含量)。

1.3 数据处理

采用 SPSS19.0、Excel 软件对数据进行统计分析、回归分析并作图, 土壤采样点分布图利用 ArcGIS10.2 软件绘制, 由于坡向、坡度、土壤类型为分类变量, 参考前人研究森林划分立地条件等级^[11], 可将坡向分为阳坡(南、西南、东南、西)和阴坡(北、东北、西北、东); 坡度可分为缓坡($5^{\circ} \sim 15^{\circ}$)、斜坡($15^{\circ} \sim$

25°)、陡坡($25^{\circ} \sim 35^{\circ}$)、急坡($35^{\circ} \sim 45^{\circ}$)、险坡($>45^{\circ}$); 不同海拔高度按土壤带可划分为砖红壤带($<650\text{ m}$)、砖红壤性红壤或赤红壤带($650 \sim 1\,100\text{ m}$)、红壤和黄壤带($1\,100 \sim 2\,200\text{ m}$)、棕壤带($2\,100 \sim 3\,400\text{ m}$)、暗棕壤带($3\,200 \sim 4\,200\text{ m}$)、暗棕色针叶林土带($4\,000 \sim 4\,300\text{ m}$)、山地草甸土带($4\,300 \sim 4\,600\text{ m}$)^[12-13], 最后采用哑变量(虚拟变量)进行赋值, 再进行回归分析。

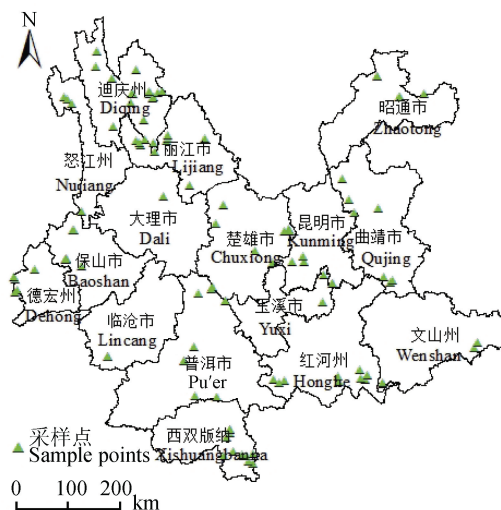


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of the soil sampling points in Yunnan Province

2 结 果

2.1 云南省森林土壤腐殖质组分分布特征

胡敏酸碳(HA-C)、富里酸碳(FA-C)是土壤腐殖质的重要组成部分, 它们在土壤肥力、养分循环方面起着重要作用, 胡富比值表示胡敏酸碳与富里酸碳比值, 可反映腐殖化芳构化程度、聚合度以及稳定性。从表 1 可看出, 云南省森林土壤有机碳含量介于 $8.40 \sim 199.73\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $51.37\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远远高于全国平均水平($17.53\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 其腐殖质各组分含量(可提取腐殖质碳、胡敏酸碳、富里酸碳)范围分别为 $2.54 \sim 84.02\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.99 \sim 33.64\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.40 \sim 57.16\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各组分变异系数较高, 其中富里酸碳、胡富比大小变异系数最高为 0.86, 总体来看该区土壤腐殖质组分空间差异较大; 土壤 C/N 均值(14.25)高于全国平均水平(11.38), 胡富比平均值为 $0.78 < 1$, 说明云南省森林土壤整体腐殖物质聚合程度较低。

表 1 云南省森林土壤总体腐殖质组分特征

Table 1 Characteristics of the composition of the total humus in the forest soils of Yunnan Province						
腐殖质组分	样本量 Sample	极小值 Min	极大值	均值 Mean /	标准差	变异系数
Humus composition	number	/ (g·kg ⁻¹)	Max/ (g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	SD / (g·kg ⁻¹)	CV
有机碳 SOC	88	8.40	199.73	51.37	42.58	0.83
可提取腐殖质碳 HE-C	88	2.54	84.02	24.52	19.32	0.79
胡敏酸碳 HA-C	88	0.99	33.64	9.35	7.55	0.81
富里酸碳 FA-C	88	1.40	57.16	15.17	13.10	0.86
胡富比 H/F	88	0.17	4.59	0.78	0.67	0.86
C/N	88	4.68	41.72	14.25	5.19	0.36

2.2 云南省森林土壤腐殖质含量影响因素

2.2.1 坡向、坡度 由表 2 可知，阳坡土壤腐殖质各组分含量均大于阴坡，胡富比、碳氮比大小表现为阳坡小于阴坡，但差异不大，这说明坡向并不是影响土壤腐殖质各组分含量的主要因素。

本研究不同坡度下土壤有机碳组分变化规律各不相同（表 3），其中土壤可提取腐殖质碳、胡敏酸碳含量在 5°~45°范围内随着坡度的升高而增加，其他腐殖质组分与坡度间变化规律不明显。

2.2.2 海拔 由表 4 可知，土壤腐殖质各组分碳含量与海拔有着紧密联系，其中在海拔小于 4 000 m 范围内，腐殖质各组分碳含量、土壤 C/N 比值随着海拔升高而增加，在海拔 3 200~4 000 m 范围内的

暗棕壤带下土壤腐殖质碳含量、土壤 C/N 比值最高，当海拔超过 4 300 m 后，即山地草甸土带下有机碳各组分碳含量、土壤 C/N 比值明显降低。胡富比值与海拔间变化关系不明显。

2.2.3 土壤类型 由表 5 可知，云南省不同类型森林土壤腐殖质组分的平均含量特征，其中有机碳含量具体表现为暗棕壤（113.50 g·kg⁻¹）>黄棕壤（63.14 g·kg⁻¹）>高山草甸土（61.26 g·kg⁻¹）>棕壤（48.02 g·kg⁻¹）>红壤（44.24 g·kg⁻¹）>紫色土（37.47 g·kg⁻¹）>黄壤（37.29 g·kg⁻¹）>赤红壤（25.59 g·kg⁻¹）>砖红壤（16.83 g·kg⁻¹），腐殖质作为土壤有机碳的主要组成部分，可提取腐殖质碳含量表现规律与有机碳相似。各类型土壤下碳氮比范

表 2 不同坡向森林土壤腐殖质组分特征

Table 2 Composition of the humus in forest soils relative to slope aspect							
坡向	样本量	有机碳 SOC/	可提取腐殖质碳	胡敏酸碳 HA-C/	富里酸碳 FA-C/	胡富比 H/F	C/N
Slope aspect	Sample number	(g·kg ⁻¹)	HE-C/ (g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)		
阳坡 Sunny slope	37	52.96	26.13	9.80	16.33	0.70	14.08
阴坡 Shady slope	51	50.22	23.35	9.02	14.33	0.85	14.38

表 3 不同坡度森林土壤腐殖质组分特征

Table 3 Composition of the humus in forest soil relative to slope degree							
坡度	样本量	有机碳	可提取腐殖质碳	胡敏酸碳 HA-C/	富里酸碳	胡富比	C/N
Slope degree	Sample number	SOC/ (g·kg ⁻¹)	HE-C/ (g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	FA-C/ (g·kg ⁻¹)	H/F	
缓坡 Gentle slope	22	51.23	22.56	8.56	14.00	0.86	15.32
斜坡 Abrupt slope	25	53.11	22.71	8.93	13.78	0.83	14.47
陡坡 Steep slope	27	50.99	26.89	9.85	17.04	0.70	13.01
急坡 Acute slope	12	51.06	27.03	10.86	16.17	0.82	13.54
险坡 Dangerous slope	2	33.24	21.16	7.06	14.10	0.51	11.69

表 4 不同森林土壤腐殖质组分特征

Table 4 Composition of the humus in forest soil relative to elevation

土壤带	样本量	有机碳 SOC/	可提取腐殖质碳	胡敏酸碳 HA-C/	富里酸碳 FA-C /	胡富比 H/F	C/N
Soil zone	Sample number	(g·kg ⁻¹)	HE-C/ (g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)		
砖红壤带 ^①	2	13.31	7.61	2.71	4.90	0.55	9.39
赤红壤带 ^②	8	23.30	12.30	5.02	6.34	0.71	10.72
红壤或黄壤带 ^③	45	47.45	22.95	8.53	14.43	0.75	13.37
棕壤带 ^④	20	51.52	25.01	9.82	15.20	0.98	15.55
暗棕壤带 ^⑤	11	92.67	39.50	16.39	23.11	0.73	18.76
山地草甸土带 ^⑥	2	61.26	38.26	6.10	32.16	0.19	15.25

① Humid-thermo ferrallitic zone, ② Lateritic red soil zone, ③ Yellow soil or red soil zone, ④ brown soil zone, ⑤ Dark brown soil zone, ⑥ Alpine meadow soil zone.

表 5 不同类型土壤腐殖质组分平均含量特征

Table 5 Mean contents of humus components relative to soil type

土壤类型	采样地点	有机碳 SOC	可提取腐殖质碳	胡敏酸碳 HA-C/	富里酸碳 FA-C	胡富比	C/N
Soil type	Soil sampling site	/ (g·kg ⁻¹)	HE-C/ (g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	H/F	
砖红壤 ^①	HH、DH、BN	16.83	8.84	3.07	5.77	0.53	9.73
赤红壤 ^②	HH、DH、BN、PE	25.59	13.21	6.51	6.71	0.90	11.66
黄壤 ^③	HH、WS、BS、LC	37.29	19.09	6.36	12.73	1.09	12.07
紫色土 ^④	CX、KM、QJ、ZT、BN、PE	37.47	20.51	6.76	13.75	0.68	13.84
高山草甸土 ^⑤	DQ	61.26	38.26	6.10	32.16	0.19	15.25
红壤 ^⑥	CX、KM、HH、WS、BS、DQ、QJ、PE	44.24	23.46	8.82	14.64	0.62	13.86
棕壤 ^⑦	DQ、NJ、LJ	48.02	24.04	10.31	13.73	0.40	15.09
黄棕壤 ^⑧	CX、HH、YX、HH、WS、BS、NJ、QJ	63.14	22.84	9.46	13.38	1.03	15.50
暗棕壤 ^⑨	DQ、NJ、LJ	113.50	54.33	21.07	33.27	0.69	18.92

HH—红河 Honghe, DH—德宏 Dehong, BN—西双版纳 Xishuangbanna, PE—普洱 Pu'er, WS—文山 Wenshan, BS—保山 Baoshan, LC—临沧 Lingcang, CX—楚雄 Chuxiong, KM—昆明 Kunming, ZT—昭通 Zhaotong, DQ—迪庆 Diqing, LJ—丽江 Lijiang, QJ—曲靖 Qujing, NJ—怒江 Nujiang, YX—玉溪 Yuxi; ① Humid-thermo ferrallitic, ② Lateritic red soil, ③ Yellow soil, ④ Purple soil, ⑤ Alpine meadow soil, ⑥ Red soil, ⑦ Brown earth, ⑧ Yellow brown soil, ⑨ Dark brown soil.

围在 9.73~18.92 间变化,富里酸碳平均含量皆高于胡敏酸碳含量,各土壤胡富比平均值由高到低依次为黄壤(1.09)>黄棕壤(1.03)>赤红壤(0.90)>暗棕壤(0.69)>紫色土(0.68)>红壤(0.62)>砖红壤(0.53)>棕壤(0.40)>高山草甸土(0.19),其中黄壤、黄棕壤胡富比大于 1,这说明云南省 9 种森林土壤中黄壤、黄棕壤腐殖质聚合程度较高。
2.2.4 年均温与年降水量 森林生态系统土壤碳输入主要来自于地上部植被及根系凋落物。一方面,温度、水分通过制约植被种类、生产力来影响土壤

有机碳数量和质量;另一方面,土壤有机碳分解过程亦受到温度、水分的控制。通过分析云南省各地州(市)年均温、年均降水量对土壤有机碳各组分的影响,得出年均降水量与有机碳各组分含量相关性不显著($P>0.05$),说明云南省年降水量不是土壤腐殖质组分的控制性因素。年均温与有机碳组分(有机碳、腐殖酸、胡敏酸、富里酸)含量达到显著负相关($P<0.05$)(图 2),与 C/N 达到极显著负相关($P<0.01$),与胡富比相关性不显著,即随着年均温的升高,土壤有机碳各组分含量降低。

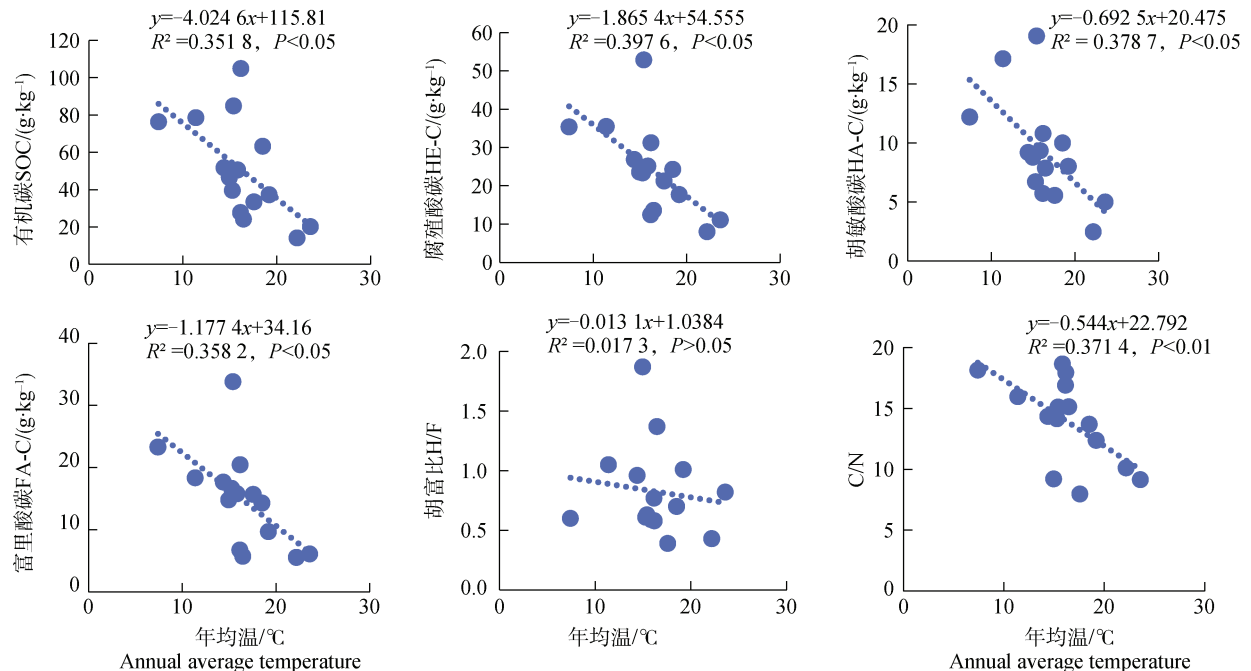


图2 采样点年均温与有机碳各组分含量的关系

Fig. 2 Relationships of annual mean temperature with content of each component of the soil organic carbon

2.3 云南省森林土壤有机碳组分主控影响因素

前人研究表明,森林土壤有机碳组分受到气候、植被、地形、母质、土壤类型、土地利用方式等多种因素共同影响^[14-15],土壤有机碳与土壤腐殖质之间有着密切联系。为定量分析各因素对云南省森林土壤腐殖质组分的不同影响程度,本研究对气候因素(年均温、年降水量)、坡度、坡向、海拔、土壤类型进行回归分析。结果表明:年降水量、坡度、坡向对土壤腐殖质组分影响并不显著($P > 0.05$),未能进入回归方程,但海拔、土壤类型、年均温对土壤腐殖质组分影响差异显著($P < 0.01$ 或 0.05)。这说明土壤类型、海拔、年均温是影响土壤腐殖质组分含量的主要因子,这一研究结果与前人研究吻合^[16]。

除胡富比与海拔关系不显著外,海拔对不同腐殖质组分含量的影响均表现为显著($P < 0.05$),这说明在研究区土壤条件下,与海拔联系更为紧密的是土壤腐殖质各组分绝对含量而不是其组成结构,其中海拔对土壤碳氮比空间变异的独立解释能力最高,为13.9%,其次是有机碳、胡敏酸碳、可提取腐殖质碳和富里酸碳,分别为13.3%、11.1%、9.4%和8.7%。不同土壤类型对土壤腐殖质各组分含量影响表现为极显著($P < 0.01$),土壤类型对总有机碳、可提取腐殖质碳、胡敏酸碳、富里酸碳、碳氮比空间变异的独立解释能力分别为30.1%、29.6%、30.9%、

24.3%、11.5%,但土壤类型对胡富比影响不显著。年均温对土壤腐殖质各组分含量影响表现为极显著($P < 0.01$),年均温对土壤有机碳、可提取腐殖酸碳、胡敏酸碳、富里酸碳、碳氮比空间变异的独立解释能力为22.2%、19.5%、13.7%、18.8%、18.0%。

3 讨论

3.1 云南省森林土壤腐殖质组分分布特征

不同区域土壤腐殖质组分含量及组成差异受气候、生物、母质、地形等多因素共同影响。河北省主要土壤腐殖质平均含量为 $17.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, HA/FA 比值平均值大于1;亚热带地区大围山不同海拔下土壤腐殖质含量在 $2.99 \sim 49.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 间变化,其 HA/FA 比值均小于1。与我国其他区域土壤相比^[17],云南省森林土壤腐殖质平均含量($51.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处于较高水平,但土壤胡富比比值小于1,属富里酸型土壤,这与熊顺贵^[18]研究结果一致。土壤腐殖质是有机碳的主要承载者,一方面可反映土壤肥力大小,另一方面土壤腐殖化程度也代表了有机碳库中的相对稳定性。由此可知,云南省森林土壤肥力整体较高,但土壤腐殖化程度较低。

从云南省不同区域土壤腐殖质分布情况来看,

土壤腐殖质高值区主要出现在滇东北、滇西北部,但土壤胡富比分布规律与腐殖质规律表现相反,其高值区主要出现在滇中部、滇南部。其原因在于滇西北部属原始林区,受人为干扰活动较少,海拔较高,温度较低,降水量减少,微生物活性受到限制,土壤有机碳分解率降低,从而土壤腐殖质碳含量较高。而滇南部处于亚热带地区,森林土壤表层虽有大量动植物残体作为有机碳来源,但夏季高温多雨、常年气温较高使得土壤有机碳分解速率加快^[19];高温有利于胡敏酸碳的形成,不利于富里酸碳的形成^[20],从而导致土壤腐殖质含量较低,胡富比比值较高;且滇中部除温度、水分、成土母质等环境因子影响外,人类活动的作用也不可小觑,因为林地一般受到干扰后,表层土壤含碳量可下降至2%以下^[21]。总体来看,云南省森林土壤腐殖质含量组成规律表现为有机碳含量低的腐殖质组成中胡敏酸碳比例更高,这主要是因为土壤胡敏酸分子结构较富里酸更稳定^[22],随着土壤有机物质的不断分解,不稳定组分首先被土壤中的微生物利用,稳定性组分只有在不稳定组分消耗完时才有可能被微生物利用^[23]。

3.2 云南省森林土壤腐殖质组分含量影响因素

(1) 海拔。云南省森林土壤腐殖质各组分碳含量随着海拔升高呈现先增加后下降的变化趋势,这与前人研究结果^[5]相吻合。海拔是环境因素的综合体现,海拔通过影响温度、降雨等因素来制约土壤微生物数量及活性,进而影响到土壤有机碳组分积累量^[24-25]。其中海拔对土壤腐殖质各组分影响显著($P<0.05$),对胡富比比值影响不显著。已有研究表明,随着海拔的升高,温度降低,土壤含水量增加^[26],人为干扰较弱,植被凋落物质量提高,有机碳积累量增加,土壤腐殖质含量升高,尤其是高海拔地区低温、湿润的气候,更有利于土壤有机碳积累。本研究中当海拔大于4 300 m时,即主要土壤类型为高山草甸土时,土壤腐殖质组分含量开始下降,这可能是因为森林土壤碳输入主要来自于植被光合作用固定大气中的二氧化碳,然后通过植物残体、根系及根系分泌物进入土壤^[27]。而高山草甸土地表植被主要为草本植物、灌木丛,从而导致土壤腐殖化底物减少,腐殖质含量降低。

(2) 土壤类型。云南省森林土壤种类繁多,不同类型土壤是在气候、地形、生物、母质等不同成土条件下发育而成,不同成土因素会影响土壤腐殖质生成

量,最后影响土壤腐殖质组分构成(HA/FA)^[28]。本研究中,土壤类型对总有机碳、可提取腐殖质碳、胡敏酸碳、富里酸碳含量空间变异影响显著,但对胡富比影响不显著。这说明土壤类型是影响土壤腐殖质各组分含量的主要因素,而对土壤腐殖质组分构成影响不显著。其中土壤类型对总有机碳、可提取腐殖质碳、胡敏酸碳、富里酸碳含量、C/N比值的独立解释能力分别为30.1%、29.6%、30.9%、24.3%、11.5%,这与其他区域研究结果不一致,如四川省仁寿县土类对有机碳空间变异独立解释能力为23.7%^[16],这主要是因为本研究中土壤类型较多,不同类型土壤成土条件、成土过程差异明显,导致土壤类型对腐殖质组分解释能力较高。

(3) 坡向、坡度。本研究表明,阳坡土壤腐殖质各组分含量均大于阴坡,胡富比比值、碳氮比值均表现为阴坡大于阳坡,但坡度与坡向对土壤腐殖质各组分影响并不显著,这与高宏英等^[29]研究结果一致。一般认为坡向不同,可能导致地表温度、日照时间不同,从而造成林下小气候差异^[30]。阳坡地表温度、日照时间均大于阴坡,反之土壤水分阳坡小于阴坡。阳坡日照时间较长,水热条件较好,有利于微生物活动,植物生长旺盛,有机物质积累丰富,从而形成的腐殖物质较多^[31]。阳坡土壤温度较高,土壤水分含量较低,高温干旱条件下不利于胡敏酸碳的积累,从而阳坡土壤胡富比小于阴坡。

坡度对云南省森林土壤腐殖质组分含量影响不显著。前人研究发现坡度越高,土壤抗侵蚀能力越差,重力和淋洗作用越强,有机质易于流失,土壤腐殖质含量降低,即土壤腐殖质含量随着坡度增大而降低^[29-31],这与本研究结果不一致,这可能是因为云南省良好的生物气候条件削弱了其坡度对腐殖质组分含量的影响。

(4) 年均温与年降水量。本研究结果表明,研究区气候因素中年降水量对森林土壤腐殖质组分含量影响不显著($P>0.05$),这与黄一敏等^[6]研究结果一致。而年均温对土壤腐殖质组分含量影响呈极显著负相关,对胡富比影响不显著,这说明年均温是影响云南省森林土壤腐殖质组分分布的主要因子,且土壤腐殖质组分含量随着年均温升高而减小($P<0.01$)。气候变化对土壤的影响和土壤对于气候变化的反馈作用是极其复杂的,其中土壤有机碳升降主要取决于气温和降雨量升高所引起土壤有机碳

变化量,当土壤分解量大于有机碳输入量时,有机碳储量减少,反之则增加。前人研究发现温度升高促进了植物光合作用,增加了土壤中植物凋落物输入量,从而使土壤有机碳含量增加;但温度升高促进植物生长的同时也会刺激微生物种群的增长,从而加速土壤有机碳的分解^[32]。也有研究^[33]认为:温度升高使可利用水分减少,使热带森林植被的净第一性生产力减少,有机碳含量降低。由此可知气温升高并不一定意味着土壤有机碳的增加。土壤腐殖化过程同样也受到温度、水分的综合调控,窦森等^[22]研究表明低温不利于胡敏酸碳的形成,不利于其芳化度的增大,二氧化碳浓度较高、水分充足条件下更有利于富里酸的稳定。即温度相对较高,胡敏酸碳更易形成,低纬度地区土壤有机碳随着温度的升高而增加的趋势,与本研究结果不一致,一方面云南省虽然处于低纬度地区,但错综复杂的地形地貌改变了热量的再分配,导致土壤腐殖质各组分含量与性质有所差异;另一方面,有研究发现从湿冷向湿热变化的水热条件下是不利于土壤腐殖质积累和腐殖质缩合^[34]的,且腐殖化过程本身就是胡敏酸与富里酸互相不断转化的过程,其影响机制可能还需结合水热条件、植被条件、土壤条件进一步研究。此外,本研究采用各地州(市)年均温平均值进行统计分析,其结果也可能会产生一定的误差。

(5) 主控因子。回归分析结果表明,土壤类型、海拔、年均温对腐殖质各组分含量影响显著,对胡富比影响不显著,由此可知,土壤类型、海拔、年均温是影响云南省森林土壤腐殖质组分空间分布的主要因子。腐殖质作为土壤有机碳的稳定组分,各组分影响因素独立解释能力大小与有机碳一致,总体呈现为土壤类型对土壤腐殖质各组分的独立解释能力最高,其次是年均温、海拔。但土壤碳氮比作为土壤腐殖质特性指标,其大小可反映有机质分解状况,各影响因素对其独立解释能力大小依次为年均温>海拔>土壤类型,其主要原因在于年均温、海拔直接影响了生物气候条件,导致其土壤微生物分解状况发生改变,从而影响土壤腐殖质分解。因此在进行大尺度森林土壤碳循环研究时应综合考虑土壤类型、海拔、年均温等环境因子。

4 结 论

云南省森林土壤表层有机碳含量为 8.40~

199.73 g·kg⁻¹,平均含量为 51.37 g·kg⁻¹;土壤可提取腐殖质碳含量为 2.54~84.02 g·kg⁻¹,平均含量为 24.52 g·kg⁻¹,均高于全国平均水平;胡富比均值小于 1,土壤腐殖质聚合度较低。从不同区域来看,土壤腐殖质组分分布特征表现为滇西北、滇东北较高,滇中、滇南较低。回归分析结果表明,土壤类型、海拔、年均温是影响云南省森林土壤腐殖质组分含量的主导因子,各因素的贡献程度总体呈现为土壤类型最高,其次为年均温、海拔,这说明土壤类型对森林表层土壤腐殖质的积累起重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Li C, Jean-Marie Séquaris, Berns A E, et al. NMR characterization and sorption behavior of agricultural and forest soil humic substances[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2010.
- [2] Piccolo A, Conte P, Spaccini R, et al. Influence of land use on the characteristics of humic substances in some tropical soils of Nigeria[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56 (3): 343—352.
- [3] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, 199 (4325): 141—146.
- [4] Du H, Zeng F P, Song T Q, et al. Spatial pattern of soil organic carbon of the main forest soils and its influencing factors in Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40 (4): 282—291. [杜虎, 曾福平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40 (4): 282—291.]
- [5] Wang Y L, Zi H B, Cheng R X, et al. Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (11): 4096—4105. [王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39 (11): 4096—4105.]
- [6] Huang Y M, Li X Q, Yang F, et al. Spatial variation of soil organic carbon in karst forests of the southwestern China and its affecting factors[J]. Earth and Environment, 2016, 44 (1): 1—10. [黄一敏, 李心清, 杨放, 等. 中国西南喀斯特森林土壤有机碳空间变化及影响因素[J]. 地球与环境, 2016, 44 (1): 1—10.]
- [7] Wasige J E, Groen T A, Rwamukwaya B M, et al. Contemporary land use/land cover types determine soil organic carbon stocks in south-west Rwanda[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 100 (1): 19—33.
- [8] Deng L, Shangguan Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28 (1): 151—165.

- [9] Pei Y H, Li J. Carbon storage of forest vegetation in Yunnan Province and its dynamic change in recent 10 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10 (3): 93—98. [裴艳辉, 李江. 云南省森林植被碳储量及其近 10 年动态变化[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10 (3): 93—98.]
- [10] Dou S. Soil organic matter[M]. Beijing: Science Press, 2010. [窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [11] Luo W X, Liu G Q, Li J J. Cultivation techniques of main tree species in northwest China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007. [罗伟祥, 刘广全, 李嘉珏. 西北主要树种培育技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.]
- [12] Yu G F, Chen Y S. On soil distribution in Yunnan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 1998, 20 (1): 55—58, 63. [虞光复, 陈永森. 论云南土壤的地理分布规律[J]. 云南大学学报 (自然科学版), 1998, 20 (1): 55—58, 63.]
- [13] Zhou L F. Characteristics and zonality of soil distribution in Yunnan Province[J]. Mountain Research. 1983 (4): 31—38. [周乐福. 云南土壤分布的特点及地带性规律[J]. 山地研究, 1983 (4): 31—38.]
- [14] Wang L H, Xue J Y, Xie Y, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon among different climate types in Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42 (3): 297—306. [王丽华, 薛晶月, 谢雨, 等. 不同气候类型下四川草地土壤有机碳空间分布及影响因素[J]. 植物生态学报, 2018, 42 (3): 297—306.]
- [15] Zhang Y, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2008, 29 (8): 2314—2319. [张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29 (8): 2314—2319.]
- [16] Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil organic carbon and related controlling factors in Renshou County, Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23 (1): 34—42. [罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23 (1): 34—42.]
- [17] An H Y. Humus characteristics of main soils in Hebei Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. [安红艳. 河北省主要土壤腐殖质特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.]
- [18] Xiong S G. The basis of soil science [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001. [熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.]
- [19] Li X, Wang F, Cao Y, et al. Soil carbon storage and its determinants in the forests of Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41 (9): 953—963. [李茜, 王芳, 曹扬, 等. 陕西省森林土壤固碳特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2017, 41 (9): 953—963.]
- [20] Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (2): 412—418. [窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48 (2): 412—418.]
- [21] Xu L F, Xu A W, Li Z A. Research progresses in mechanisms of soil carbon sequestration in plantations in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22 (6): 1063—1067. [许炼烽, 徐谔为, 李志安. 森林土壤固碳机理研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22 (6): 1063—1067.]
- [22] Dou S, Yves T, Zhang J J, et al. Thermo dynamic stability of humic acid and fulvic acid in soil and its driving factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (1): 71—76. [窦森, Yves Tardy, 张晋京, 等. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47 (1): 71—76.]
- [23] Pan G X, Ding Y J, Chen S T, et al. Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34 (5): 451—470. [潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J]. 地球科学进展, 2019, 34 (5): 451—470.]
- [24] Silver W L, Lugo A E, Keller M. Soil oxygen availability and biogeochemistry along rainfall and topographic gradients in upland wet tropical forest soils[J]. Biogeochemistry, 1999, 44 (3): 301—328.
- [25] Chen T J, Hu Y K, Liu Y Y, et al. Distribution characteristics and storage of soil organic carbon in the southern slope Altai Mountains[J]. Arid Land Geography, 2014, 37 (6): 1231—1239. [陈廷舰, 胡玉昆, 柳妍妍, 等. 阿尔泰山南坡土壤有机碳密度的分布特征和储量估算[J]. 干旱区地理, 2014, 37 (6): 1231—1239.]
- [26] Ding X Q, Ma H J, Zhu X L, et al. The vertical distribution characteristics of soil organic carbon in different altitude of Dawei Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (2): 258—262. [丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 等. 大围山不同海拔森林土壤有机碳垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (2): 258—262.]
- [27] Zhang X X, Liu Z W, Bing Y H, et al. Soil humus differentiation and correlation with other soil biochemical properties in pure forests in semi-arid low-hilly area of Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (10): 2819—2825. [张晓曦, 刘增文, 邴塬皓, 等. 内蒙半干旱低山区不同纯林土壤腐殖质分异特征及其与其他生物化学性质的关系[J]. 应用生态学报, 2014, 25 (10): 2819—2825.]

- [28] Wang X H. Spatial variation of organic matter in horizontal zonal soils in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001 (1): 19—23. [王秀红. 我国水平地带性土壤中有机的空间变化特征[J]. 地理科学, 2001(1): 19—23.]
- [29] Gao H Y, Ai Y W, Wang K X, et al. Effects of humus component and organic matter of the synthetic soil on the rock slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (6): 244—248. [高宏英, 艾应伟, 王克秀, 等. 坡位与坡向对岩石边坡人工土壤腐殖质组分及有机质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27 (6): 244—248.]
- [30] Manlay R J. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 119 (3): 217—233.
- [31] Wei W, Dang K L. Spatial variation of the density of soil organic carbon in forest land on the southern slope of Qinling Mountain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55 (5): 11—19. [卫玮, 党坤良. 秦岭南坡林地土壤有机碳密度空间分异特征[J]. 林业科学, 2019, 55 (5): 11—19.]
- [32] Zhou X Y, Zhang C Y, Guo G F. A effects of climate change on forest soil organic carbon storage: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (7): 1867—1874. [周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21 (7): 1867—1874.]
- [33] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. *Nature*, 1998, 393 (6682): 249—252.
- [34] Peng F Q, Gao K L, Che Y P. Study on properties of some soil humus in China[J]. *Soils*, 1984, 16 (2): 65. [彭福泉, 高坤林, 车玉萍. 我国几种土壤中腐殖质性质的研究[J]. 土壤, 1984, 16 (2): 65.]

(责任编辑：檀满枝)