

# 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素<sup>①</sup>

王淑芳, 王效科\*, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 以密云水库上游流域 7 种典型土地利用类型为研究对象, 分析了不同土地利用类型及不同土层土壤有机碳含量的分布特征及其与气候、地形和土壤特征等因素的关系。结果表明: ①研究区域内天然次生林和草地的土壤有机碳含量最为丰富, 其次分别为灌丛和人工林, 农田最低; 0~40 cm 土层中, 土壤有机碳平均含量由高到低排序为: 杨桦林>草地>辽东栎林>灌丛>落叶松林>油松林>农田; ②除草地外, 其他 6 种土地利用类型土壤有机碳含量均以 0~10 cm 土层最大, 随着土层深度的增加呈现降低的趋势, 且降幅较大; 而草地土壤有机碳含量在 0~20 cm 范围内随剖面的延伸略有增加, 20 cm 以后表现为下降的趋势, 各土层之间的变化幅度均较小; ③各土层土壤有机碳含量均与海拔、土壤含水量、土壤全氮含量呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 而与年平均温度、年降水量、土壤体积质量和土壤 pH 值呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 与坡度之间存在很弱的正相关且未达到显著水平 ( $p > 0.05$ ); 偏相关分析表明, 影响土壤有机碳含量的关键因素随土壤深度不同而不同, 其中 0~10 cm 土层土壤有机碳含量最主要的影响因素为土壤全氮含量、土壤体积质量和土壤 pH 值, 而 10~20 cm 土层为土壤全氮含量、土壤体积质量和坡度, 20~40 cm 土层则为土壤全氮含量和年降水量; ④影响不同土地利用类型土壤有机碳含量的主要因素, 草地和农田均为土壤全氮含量和年平均温度, 落叶松林为土壤全氮含量和土壤含水量, 油松林为土壤体积质量、土壤全氮含量和土壤 pH 值, 杨桦林和辽东栎林均为土壤全氮含量和土壤体积质量, 灌丛则为土壤 pH 值。

**关键词:** 密云水库上游流域; 土壤有机碳含量; 土地利用类型; 土层; 影响因素

**中图分类号:** S151.9; S154.1

陆地土壤是全球最大的碳库, 总碳储量约为 2 500 Pg, 分别是大气碳库 (760 Pg) 的 3.3 倍和生物碳库 (560 Pg) 的 4.5 倍, 其中土壤有机碳 (SOC) 储量约为 1 550 Pg, 占陆地生态系统碳库的  $2/3$ <sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳不仅为植被生长提供碳源, 而且有利于维持土壤良好的物理结构和养分输送, 是反映土壤质量和土地健康的重要指标, 直接影响土壤肥力和土地生产力<sup>[3]</sup>。同时, 土壤有机碳受土壤微生物的分解作用以 CO<sub>2</sub> 等温室气体的形式向大气释放碳, 对全球气候变化产生影响, 并且由于土壤有机碳库容量巨大, 其较小幅度的变化即可能导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度较大幅度的波动, 因而而在全球碳循环过程中起着极其重要的作用。因此, 国内外学者<sup>[4-15]</sup>对土壤有机碳储量、分布、迁移、转化与平衡及其影响因素等方面极为关注, 已开展了大量研究工作, 并取得了丰硕的成果。然而, 目前对密云水库上游流域主要土地利用类型土壤有机碳特征及其影响因素的研究却鲜有报道。因此, 本文以密云水库

上游流域草地、农田、人工华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr.) 林、人工油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 林、天然次生山杨 (*Populus davidiana* Dode) /白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 混交林、天然次生辽东栎 (*Quercus wutaishanica* Blume) 林和灌丛等 7 种典型土地利用类型为研究对象, 探讨区域内土壤有机碳的分布特征及其与气候 (温度和降水)、地形 (海拔和坡度) 和土壤特征 (土壤体积质量、土壤含水量、土壤全氮含量和土壤 pH 值) 等因素的关系, 旨在为该区域土壤有机碳库及碳循环研究提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

密云水库位于京郊密云县城北山区, 横跨潮河、白河主河道上, 距北京约 100 km, 总库容 43.75 亿 m<sup>3</sup>, 是华北地区最大的水库, 也是北京市最重要的地

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2006CB403402) 资助。

\* 通讯作者 (wangxk@rcees.ac.cn)

作者简介: 王淑芳 (1981—), 女, 江西龙南人, 博士研究生, 主要从事陆地生态系统碳循环研究。E-mail: fangfang\_6281@163.com

表水水源地。密云水库上游流域（即密云水库以上潮白河流域）地处  $40^{\circ}19' \sim 41^{\circ}31' \text{N}$ 、 $115^{\circ}25' \sim 117^{\circ}33' \text{E}$  之间，由注入密云水库的潮河和白河两大水系组成，总流域面积  $15\,788 \text{ km}^2$ ，约占潮白河流域总面积的 88%。流域辖区主要涉及河北省的赤城县、沽源县、丰宁满族自治县、滦平县以及北京市的密云县、怀柔区、延庆县等区县，流域面积的 2/3 在河北省境内，1/3 在北京市境内。流域处于内蒙古地轴东段和燕山台褶带上，地势西北高、东南低，西北部以海拔  $1\,000 \sim 2\,290 \text{ m}$  的中山为主，东南部大多为低山、丘陵和部分平原。流域内气候垂直分布明显，以马营、独石口为界划分为两个气候带，即北部的中温带半干旱森林草原气候带和南部的暖温带半湿润山地气候带，多年平均降水量为  $488.9 \text{ mm}$ ，降水分布从东南向西北递减。土壤类型以淋溶褐土（28%）、棕壤（26%）、褐土性土（18%）和石灰性褐土（12%）为主。植被覆盖较好，森林和草地覆盖率达到 76% 以上（森林 49%，不同覆盖度的草地 27%），农用旱地占 21%。

### 1.2 土壤样品采集与分析

根据研究地区土地利用的特点，选取草地、农田、人工华北落叶松林、人工油松林、山杨/白桦混交林、天然次生辽东栎林和灌丛等 7 种典型土地利用类型，利用 GPS 定位，于 2009 年 8—9 月份进行了定点采样。每个样点从地表开始向下挖取土壤剖面，按  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$  和  $20 \sim 40 \text{ cm}$  分 3 层、每层采用 3 点混合的方式采集土壤混合样，共计 154 个采样点，442 个样品（灌丛采样点不足  $40 \text{ cm}$  深，分  $0 \sim 10 \text{ cm}$  和  $10 \sim 20 \text{ cm}$  两层采集）。另外每层采用环刀（容积  $100 \text{ cm}^3$ ）取土测量土壤体积质量，3 个重复。

土样带回实验室，置于通风、阴凉、干燥的室内风干，过  $2 \text{ mm}$  筛，移出砾石和根系并称重。过  $2 \text{ mm}$

筛的土样一部分用于测定土壤 pH 值和粒径分布，另一部分继续过 100 目筛，用于测定土壤有机碳和全氮含量等。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定，土壤含水量采用烘干法测定，土壤体积质量采用环刀法测定，土壤 pH 值采用电位法（水土比 2.5:1）测定，土壤全碳、全氮含量以及 C/N 比采用德国 Elementar 公司生产的 Vario EL III 型元素分析仪测定。

### 1.3 气象数据的收集与计算

根据密云水库上游流域及其周边地区 10 个气象站点的年平均温度和年降水量数据，在 ArcGIS 9.2 软件中采用 Kriging 空间插值法计算各采样点的年平均温度和年降水量。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量分布特征

由表 1 可见，在土壤有机碳含量的垂直分布中，草地土壤有机碳含量在  $0 \sim 20 \text{ cm}$  范围内随剖面的延伸略有增加，增幅仅为 3%， $20 \text{ cm}$  以后表现为下降的趋势，但降幅较小，为 6.35%，各土层土壤有机碳含量的差异均不显著（ $p > 0.05$ ）；除草地类型外，其他 6 种土地利用类型的土壤有机碳含量均以  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层最大，随着土层深度的增加呈现降低的趋势，且降幅较大，在 16.69%~34.10% 之间，其中农田土壤有机碳含量在不同土层中的差异均达显著水平（ $p < 0.05$ ），而落叶松林、辽东栎林和灌丛土壤有机碳含量的剖面差异均不显著（ $p > 0.05$ ），此外油松林和杨桦林土壤有机碳含量的剖面差异则表现得更为复杂。

表 1 不同土地利用类型土壤有机碳含量的垂直分布（g/kg）

Table 1 Vertical distributions of soil organic carbon contents in different land use types

土地利用类型	剖面深度（cm）		
	0~10	10~20	20~40
草地	$30.38 \pm 8.24 \text{ ab A}$	$31.28 \pm 11.90 \text{ ab A}$	$29.29 \pm 10.89 \text{ ab A}$
农田	$11.29 \pm 0.63 \text{ b A}$	$9.41 \pm 0.48 \text{ b B}$	$7.31 \pm 0.48 \text{ b C}$
人工华北落叶松林	$15.45 \pm 2.07 \text{ b A}$	$12.71 \pm 2.10 \text{ b A}$	$10.27 \pm 2.04 \text{ b A}$
人工油松林	$14.87 \pm 1.13 \text{ b A}$	$9.80 \pm 0.78 \text{ b B}$	$7.30 \pm 0.74 \text{ b B}$
山杨/白桦混交林	$45.71 \pm 4.98 \text{ a A}$	$33.48 \pm 4.04 \text{ a AB}$	$23.96 \pm 2.93 \text{ a B}$
天然次生辽东栎林	$34.09 \pm 7.15 \text{ ab A}$	$26.61 \pm 6.33 \text{ ab A}$	$20.39 \pm 4.96 \text{ ab A}$
灌丛	$26.91 \pm 3.90 \text{ ab A}$	$24.50 \pm 1.75 \text{ a A}$	-

注：表中数据为平均值  $\pm$  标准差，每行中相同大写字母表示不同土层间差异不显著（ $p > 0.05$ ），每列中相同小写字母表示不同土地利用类型间差异不显著（ $p > 0.05$ ），下表同。

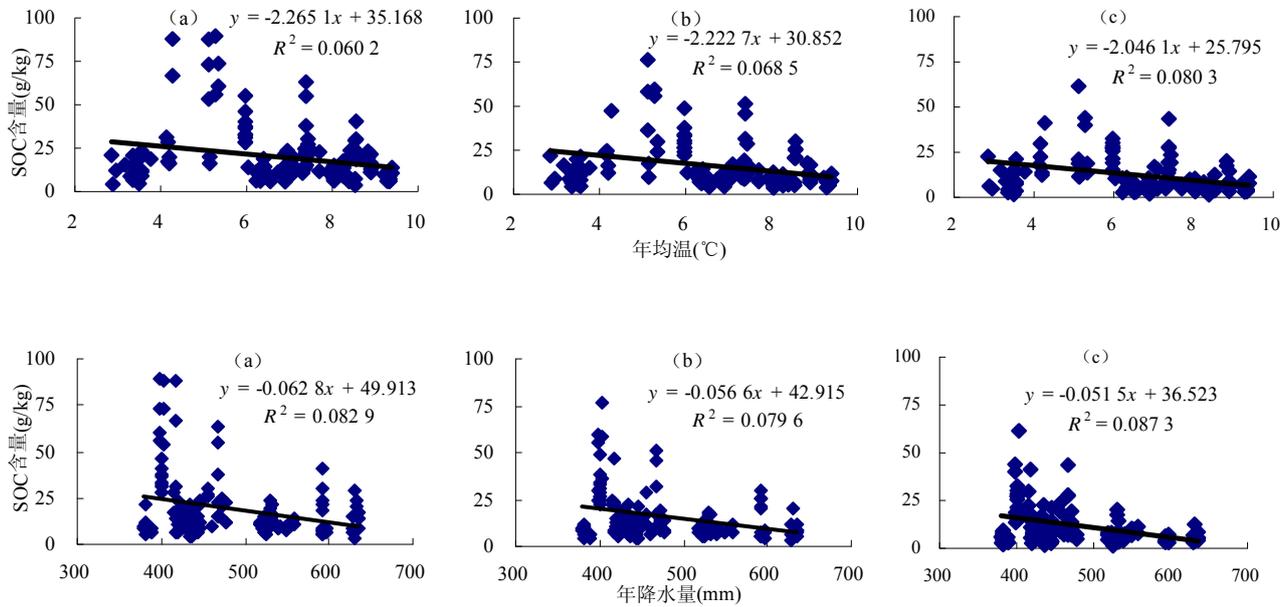
关于土壤有机碳含量在不同土地利用类型中的分布，在 0~10 cm 土层中，土壤有机碳含量为：杨桦林>辽东栎林>草地>灌丛>落叶松林>油松林>农田；在 10~20 cm 土层中，土壤有机碳含量为：杨桦林>草地>辽东栎林>灌丛>落叶松林>油松林>农田；在 20~40 cm 土层中，土壤有机碳含量为：草地>杨桦林>辽东栎林>落叶松林>农田>油松林；在整个土壤剖面中，土壤有机碳平均含量：杨桦林>草地>辽东栎林>灌丛>落叶松林>油松林>农田。在各土层中，杨桦林与农田、落叶松林、油松林这 3 种类型的土壤有机碳含量差异均达显著水平 ( $p<0.05$ )；且在 10~20 cm 土层中，灌丛与农田、落叶松林、油

松林这 3 种类型的土壤有机碳含量差异亦均达显著水平 ( $p<0.05$ )；除此之外，其他土地利用类型之间的土壤有机碳含量差异均不显著 ( $p>0.05$ )。

## 2.2 影响土壤有机碳的因素分析

### 2.2.1 气候因子对土壤有机碳的影响

在土壤有机碳的输入与分解过程中起作用的气候因子主要是温度和降水。图 1 结果表明，各土层的土壤有机碳含量均随温度和降水的增加呈现出缓慢减少的趋势，相关分析表明土壤有机碳含量与温度和降水之间的负相关均达到极显著水平 ( $p<0.01$ )。偏相关分析表明，降水对各土层土壤有机碳含量的影响均大于温度，二者的偏相关系数及相应的逐步回归方程详见表 2。



(a. 0~10 cm 土层; b. 10~20 cm 土层; c. 20~40 cm 土层; 下同)

图 1 土壤有机碳含量与气候因子的关系

Fig. 1 Relationships between soil organic carbon contents and climatic factors

表 2 土壤有机碳含量与气候因子的偏相关系数及回归方程

Table 2 Partial correlation coefficients and stepwise regression equations of soil organic carbon contents with climatic factors

影响因子	0~10 cm		10~20 cm		20~40 cm	
	偏相关系数 <i>r</i>	<i>p</i>	偏相关系数 <i>r</i>	<i>p</i>	偏相关系数 <i>r</i>	<i>p</i>
年平均温度 ( <i>T</i> )	-0.069	0.403	-0.098	0.235	-0.133	0.114
年降水量 ( <i>P</i> )	-0.170	0.039	-0.147	0.075	-0.143	0.089
回归方程	$SOC = 49.913 - 0.063P$ ( $R^2 = 0.083$ )		$SOC = 42.915 - 0.057P$ ( $R^2 = 0.080$ )		$SOC = 36.168 - 0.051P$ ( $R^2 = 0.090$ )	

2.2.2 地形因子对土壤有机碳的影响 图 2 结果显示, 从上到下各土层的土壤有机碳含量与海拔高度均存在极显著正相关,  $R^2$  分别为 0.250、0.224 和 0.238 ( $p < 0.01$ ), 而土壤有机碳含量与坡度之间存在

较弱的正相关且未达到显著水平,  $R^2$  分别为 0.019、0.011 和 0.002 ( $p > 0.05$ )。偏相关分析表明, 在地形因子中海拔高度对各土层土壤有机碳含量的影响均大于坡度, 二者的偏相关系数及相应的回归方程详见表 3。

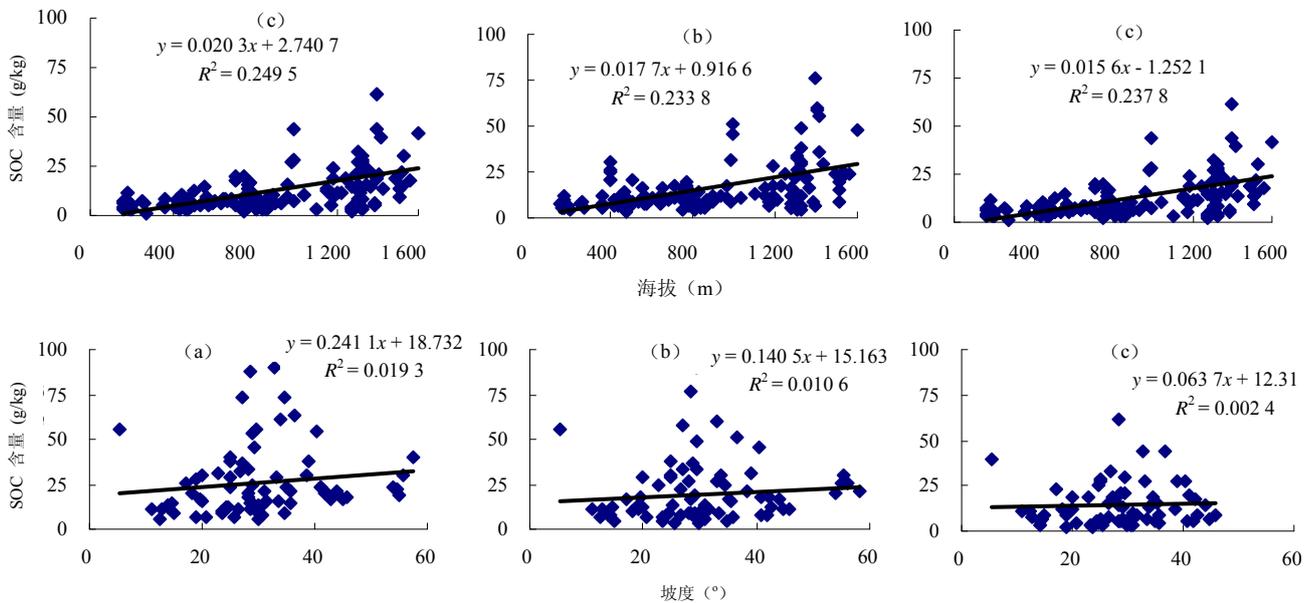


图 2 土壤有机碳含量与地形因子的关系

Fig. 2 Relationships between soil organic carbon contents and topographic factor

表 3 土壤有机碳含量与地形因子的偏相关系数及回归方程

Table 3 Partial correlation coefficients and stepwise regression equations of soil organic carbon contents with topographic factors

影响因子	0~10 cm		10~20 cm		20~40 cm	
	偏相关系数 $r$	$p$	偏相关系数 $r$	$p$	偏相关系数 $r$	$p$
海拔 (A)	0.686	0.000	0.640	0.000	0.624	0.000
坡度 (S)	0.542	0.000	0.474	0.000	0.357	0.003
回归方程	$SOC = -35.730 + 0.038A + 0.934S$ ( $R^2 = 0.481$ )		$SOC = -25.238 + 0.028A + 0.653S$ ( $R^2 = 0.416$ )		$SOC = -16.685 + 0.020A + 0.425S$ ( $R^2 = 0.390$ )	

2.2.3 土壤特征对土壤有机碳的影响 图 3 结果表明, 各土层土壤有机碳含量与土壤含水量和土壤全 N 含量均存在极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与土壤体积质量和土壤 pH 值呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ )。土壤有机碳含量与土壤特征的偏相关分析表明, 对各土层土壤有机碳含量影响最大的均为土壤全氮含量, 其次分别为 0~10 cm 土层土壤体积质量和土壤 pH 值, 而土壤含水量的影响最不显著 ( $p > 0.05$ ); 10~20 cm 土层土壤含水量、土壤 pH 值和土壤体积质量; 20~40 cm 土层土壤含水量和土壤体积质量, 而土壤 pH 值的影响最不显著 ( $p > 0.05$ )。各土层土壤有机碳含

量与土壤特征因子的偏相关系数及相应的回归方程详见表 4。

2.2.4 气候、地形和土壤特征因子对土壤有机碳影响的综合分析 由以上分析结果可见, 上述气候、地形和土壤特征因子均与土壤有机碳含量存在一定的相关关系, 都对土壤有机碳含量产生不同程度的影响。将各个因子与土壤有机碳含量进行偏相关分析, 结果 (表 5) 表明: 影响 0~10 cm 土层土壤有机碳含量最显著的因子是土壤全 N 含量 ( $p = 0.000$ ), 其次是土壤体积质量 ( $p = 0.001$ ) 和土壤 pH 值 ( $p = 0.045$ ), 土壤有机碳含量与三者的多元回归方程为:  $SOC =$

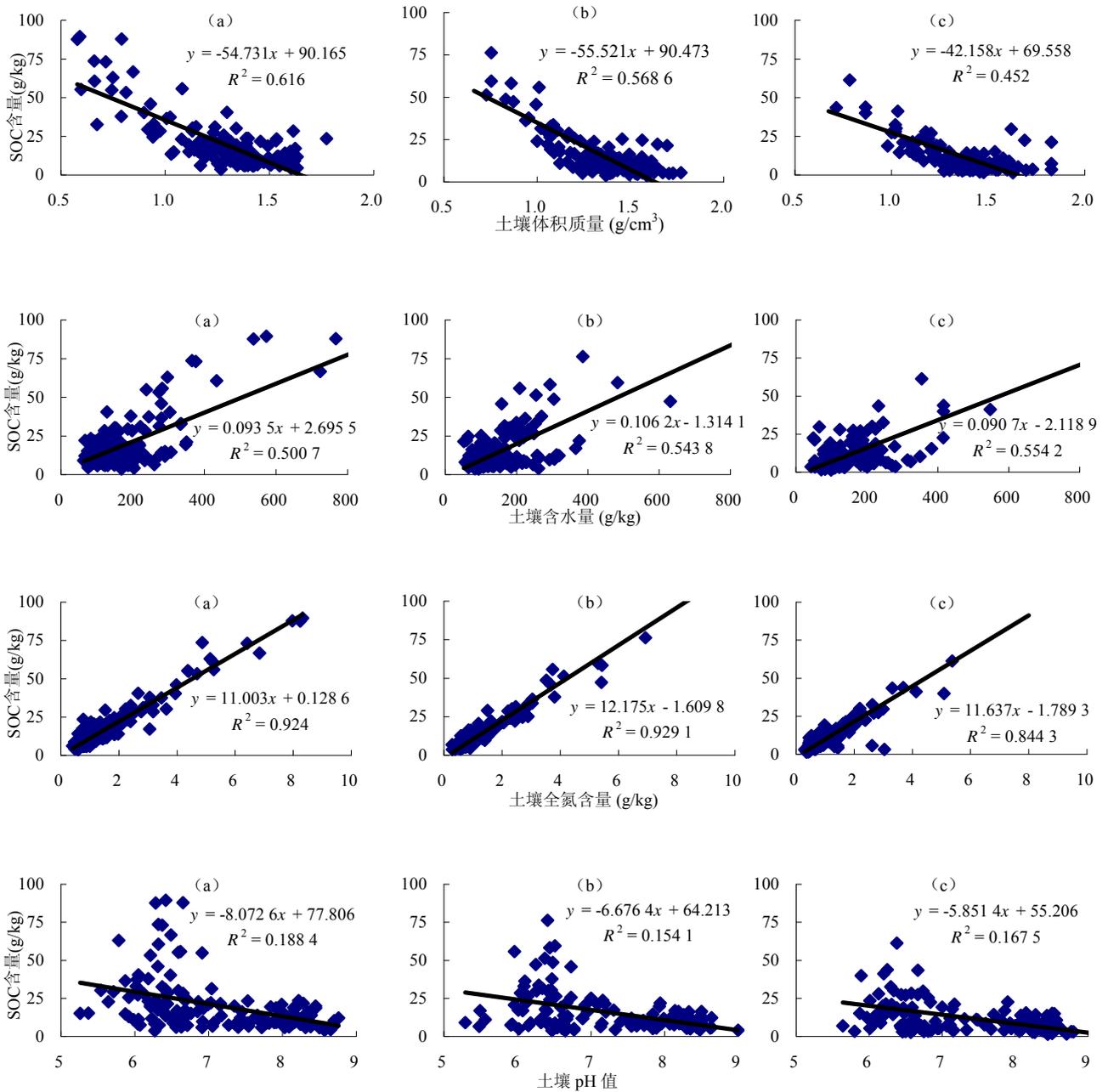


图 3 土壤有机碳含量与土壤特征的关系

Fig. 3 Relationships between soil organic carbon contents and soil characteristics

表 4 土壤有机碳含量与土壤特征的偏相关系数及回归方程

Table 4 Partial correlation coefficients and stepwise regression equations of soil organic carbon contents with soil characteristics

影响因子	0~10 cm		10~20 cm		20~40 cm	
	偏相关系数 $r$	$p$	偏相关系数 $r$	$p$	偏相关系数 $r$	$p$
土壤体积质量 ( $B$ )	-0.362	0.000	-0.171	0.039	-0.218	0.010
土壤含水量 ( $W$ )	-0.006	0.941	0.252	0.002	0.343	0.000
土壤全氮含量 ( $N$ )	0.892	0.000	0.882	0.000	0.782	0.000
土壤 pH 值 ( $pH$ )	-0.189	0.022	-0.189	0.023	-0.038	0.656
回归方程	$SOC = 23.990 + 9.475N$		$SOC = 12.392 + 10.404N - 5.028B$		$SOC = 7.713 + 9.099N +$	
	$- 10.689B - 1.029pH$ ( $R^2 = 0.940$ )		$+ 0.014W - 0.960pH$ ( $R^2 = 0.939$ )		$0.023W - 7.335B$ ( $R^2 = 0.877$ )	

23.990 + 9.475N - 10.689B - 1.029pH ( $R^2 = 0.940$ ); 对 10 ~ 20 cm 土层土壤有机碳含量影响最大的因子是土壤全氮含量 ( $p = 0.000$ ), 其次是土壤体积质量 ( $p = 0.002$ ) 和坡度 ( $p = 0.038$ ), 土壤有机碳含量与三者的多元回归方程为:  $SOC = 19.220 + 9.701N - 12.012B$

- 0.029S ( $R^2 = 0.954$ ); 对 20 ~ 40 cm 土层土壤有机碳含量影响最显著的因子依次为土壤全氮含量 ( $p = 0.000$ ) 和年降水量 ( $p = 0.013$ ), 土壤有机碳含量与二者的回归方程为:  $SOC = 8.463 + 11.238N - 0.021P$  ( $R^2 = 0.854$ )。

表 5 土壤有机碳含量与各影响因子的偏相关系数

Table 5 Partial correlation coefficients of soil organic carbon contents with influencing factors

影响因子	0 ~ 10 cm		10 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm	
	偏相关系数 $r$	$p$	偏相关系数 $r$	$p$	偏相关系数 $r$	$p$
年平均温度 ( $T$ )	-0.075	0.546	0.038	0.759	0.107	0.412
年降水量 ( $P$ )	0.221	0.072	0.165	0.183	-0.317	0.013
海拔 ( $A$ )	0.033	0.792	0.024	0.850	0.014	0.918
坡度 ( $S$ )	0.068	0.583	-0.254	0.038	0.126	0.335
土壤体积质量 ( $B$ )	-0.406	0.001	-0.374	0.002	-0.165	0.203
土壤含水量 ( $W$ )	0.063	0.611	0.038	0.761	0.168	0.194
土壤全氮含量 ( $N$ )	0.920	0.000	0.895	0.000	0.695	0.000
土壤 pH 值 ( $pH$ )	-0.245	0.045	-0.128	0.303	-0.001	0.993

不同的土地利用类型, 影响其土壤有机碳含量的关键因素也不同。不同土地利用类型土壤有机碳含量与气候、地形和土壤特征等因素的偏相关分析表明: 影响草地和农田土壤有机碳含量最显著的因子均为土壤全氮含量 ( $p < 0.01$ ) 和年平均温度 ( $p < 0.05$ ); 对落叶松林土壤有机碳含量影响最显著的因子依次为土壤全氮含量 ( $p = 0.000$ ) 和土壤含水量 ( $p = 0.006$ ); 对油松林土壤有机碳含量影响最大的因子是土壤体积质量 ( $p = 0.002$ ), 其次分别为土壤全氮含量 ( $p = 0.003$ ) 和土壤 pH 值 ( $p = 0.004$ ); 影响杨桦林和辽东栎林土壤有机碳含量最显著的因子均为土壤全氮含量 ( $p < 0.01$ ) 和土壤体积质量 ( $p < 0.05$ ); 而对灌丛土壤有机碳含量影响显著的因子仅为土壤 pH 值 ( $p = 0.007$ )。在此分析的基础上建立密云水库上游流域 7 种土地利用类型土壤有机碳含量与气候、地形和土壤特征等参数的统计回归模型 (表 6)。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 土壤有机碳的变化特征

土壤中的有机碳含量是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的动态平衡, 受气候、地形、植被、土

表 6 不同土地利用类型土壤有机碳含量与各影响因子的回归方程

Table 6 Stepwise regression equations of soil organic carbon contents with influencing factors in different land use types

土地利用类型	回归方程
草地	$SOC = 22.327 + 15.059N - 9.727T$ ( $R^2 = 0.942$ )
农田	$SOC = 5.712 + 8.512N - 0.654T$ ( $R^2 = 0.650$ )
人工华北落叶松林	$SOC = -1.816 + 8.823N + 0.030W$ ( $R^2 = 0.929$ )
人工油松林	$SOC = 43.213 - 16.383B + 3.983N - 2.100pH$ ( $R^2 = 0.402$ )
山杨/白桦混交林	$SOC = 19.199 + 9.498N - 12.804B$ ( $R^2 = 0.948$ )
天然次生辽东栎林	$SOC = 21.547 + 10.174N - 15.091B$ ( $R^2 = 0.977$ )
灌丛	$SOC = 131.164 - 15.785pH$ ( $R^2 = 0.619$ )

壤理化性质等自然条件以及土地利用、耕作管理等人类活动的综合影响, 是生态系统在特定条件下的动态平衡值。在自然生态系统中, 气候和土壤条件是土壤有机碳平衡的主要决定因素, 但在普遍存在人类活动影响的自然-人工复合生态系统中, 土壤有机碳平衡在很大程度上取决于地表植被和土地利用状况<sup>[16-20]</sup>。土地利用和土地管理, 作为人类影响自然生态系统的重要活动, 不仅可以改变土地覆被状况 (如地表植被类型、盖度、分布等的变化), 影响植物根系分布和凋落物向土壤的输入, 而且还会通过改变土壤条件影响土壤有机碳的分解速率, 从而导致土壤有机碳的变化<sup>[21-26]</sup>。因此, 不同的土地利用类型, 其植被类型不同,

植物根系分布、进入土壤的凋落物以及人为扰动土壤的方式等各异, 土壤有机碳含量及其在土壤剖面上的分布状况也有很大差异。

研究结果显示, 在密云水库上游流域的 7 种主要土地利用类型中, 0~10 cm 土层土壤有机碳含量: 杨桦林>辽东栎林>草地>灌丛>落叶松林>油松林>农田; 10~20 cm 土层土壤有机碳含量: 杨桦林>草地>辽东栎林>灌丛>落叶松林>油松林>农田; 20~40 cm 土层土壤有机碳含量: 草地>杨桦林>辽东栎林>落叶松林>农田>油松林; 在整个土壤剖面中, 土壤有机碳平均含量由高到低排序为: 杨桦林>草地>辽东栎林>灌丛>落叶松林>油松林>农田。由此可见, 在该区域内, 天然次生林(杨桦林和辽东栎林)和草地的土壤有机碳含量最为丰富, 其次分别是灌丛和人工林(落叶松林和油松林), 农田最低。一般而言, 森林植被的枯枝落叶多, 在地表分解形成很厚的腐殖质层, 是表层土壤有机碳重要的碳源物质, 并且植物根系分布深广, 大量根系脱落物和分泌物的腐解归还为深层土壤提供了丰富的碳源<sup>[27]</sup>, 因此在整个土壤剖面上森林土壤有机碳含量非常丰富; 灌丛由于灌木植被种类多且生长稠密, 不仅表层有充足的有机碳输入量, 而且地下部分细根比例高且周转速度快, 产生大量的根系脱落物和分泌物, 土壤有机碳含量比较丰富; 草地土壤有机碳的主要来源是残根, 在土中埋藏较深, 分解速率较小, 其含量也较为丰富; 而对于耕作土壤, 由于作物秸秆在收获时移出和淋溶损失较高、作物残根分解能力弱以及有机肥施用的大量减少, 降低了有机物质向土壤的输入, 同时较高强度的耕作破坏了土壤结构的稳定性, 加速了土壤有机碳的分解, 因此农田土壤有机碳含量相对较低<sup>[28-30]</sup>。

在土壤有机碳含量的垂直分布中, 除草地外, 其他 6 种土地利用类型土壤有机碳含量均以 0~10 cm 土层最大, 随着土层深度的增加呈现降低的趋势, 且降幅较大; 而草地土壤有机碳含量在 0~20 cm 范围内随剖面的延伸略有增加, 20 cm 以后表现为下降的趋势, 各土层之间的变化幅度均较小。总体上, 土壤有机碳含量沿土壤剖面的延伸呈下降的趋势, 这种变化规律与植物根系的分布格局密切相关<sup>[27]</sup>, 植物根系在土壤表层的分布数量多且范围广, 但随着土层深度的增加, 水分和营养物质向下输送受到限制, 根系分布也呈现出递减的趋势。

### 3.2 气候、地形和土壤特征因子对土壤有机碳含量的影响

在自然条件下, 土壤有机碳含量主要受气候、地

形、植被、土壤理化特征等因素的综合影响, 且各种因素间存在互作效应, 对土壤有机碳的动态变化至关重要。

在土壤有机碳的输入与分解过程中, 气候因子起着重要作用。一方面, 气候条件影响植被类型和植被生产力, 从而决定输入土壤的有机碳量; 另一方面, 从土壤有机碳输出过程来看, 微生物是其分解和周转的主要驱动力, 气候通过土壤水分(同时影响土壤通气状况)和温度等条件的变化, 影响微生物对有机碳的分解和转化<sup>[31-32]</sup>。气温升高和降水增加可能提高植物光合作用速率以及水分利用和养分利用的效率, 从而提高植物的生产力, 增加土壤有机物质的输入, 有利于土壤有机碳的积累; 也可能提高植物呼吸速率而降低土壤有机物质的输入, 并可促进土壤微生物的活动, 加速土壤有机质的分解, 从而降低土壤有机碳含量。在密云水库上游流域, 随着温度升高和降水增加, 各土层的土壤有机碳分解量大于积累量, 出现土壤有机碳含量下降的趋势, 土壤有机碳含量与温度和降水之间存在显著的负相关, 且在分别控制了降水和温度因素的情况下, 土壤有机碳含量与温度、降水之间均仍呈负的偏相关关系(表 2)。这一结果与毕珍等<sup>[33]</sup>对四川盆地森林土壤有机碳储量与温度和降水均呈显著负相关的研究结果基本一致; 但与张鹏等<sup>[34]</sup>对祁连山北麓山体垂直带土壤有机碳与年均气温显著负相关、与年均降水量显著正相关, 张城等<sup>[35]</sup>对东部典型森林类型土壤有机碳储量与年平均温度呈负相关、与年均降水量呈微弱正相关, 王淑平等<sup>[8]</sup>对东北样带土壤有机碳含量与温度之间有负相关关系、与降水量之间呈显著正相关, 傅华等<sup>[36]</sup>对阿拉善主要草地类型土壤有机碳含量与年均温呈极显著负相关、与年降水量呈显著正相关等的研究结果却有一定的差异。区别于上述各项研究中相关区域内温度因子对土壤有机碳积累产生负效应而降水因子促进土壤有机碳增加的情况, 温度和降水因子对密云水库上游流域主要土地利用类型土壤有机碳的积累均具有负效应。

海拔、坡度、坡向等地形条件支配着光、热、水资源的分配。而光、热、水资源的分配, 一方面直接影响植被类型分布和植被生产力, 继而影响到输入土壤中的凋落物量; 另一方面又在很大程度上决定着微生物的生物量和活性, 从而影响有机质在土壤中的分解速率。因此, 地形因子对土壤有机碳的输入与输出起着重要作用。本研究表明, 密云水库上游流域主要土地利用类型土壤有机碳含量与海拔高度之间呈显著正相关, 但与坡度之间存在很弱的正相关且未达到显

著水平。密云水库上游流域的年均温和年降水量与海拔高度之间均存在显著的负相关（相关系数分别为 -0.89 和 -0.74），随着海拔的升高，温度和降水均呈现下降趋势，有利于该区域土壤有机碳的积累。同时，随着海拔高度的变化，水热条件不断变化，不同海拔处的植被类型也发生相应变化，在研究区内，7 种主要土地利用类型沿海拔梯度总体分布自下而上大致为农田、油松林、灌丛、辽东栎林、落叶松林、杨桦林和坝上草地，因此，其土壤有机碳含量随海拔升高表现为增加的趋势。

土壤体积质量、含水量、含氮量、pH 值等土壤理化特征影响土壤有机碳含量及其在土壤中的稳定性。密云水库上游流域主要土地利用类型土壤有机碳含量与土壤含水量和土壤全氮含量均存在极显著正相关，而与土壤体积质量和土壤 pH 值呈极显著负相关。土壤有机碳含量随土壤含水量增加而增加，一方面，土壤含水量增加对土壤微生物的活性产生影响，抑制微生物分解土壤有机碳的能力；另一方面，土壤湿度过大，水分充塞了绝大部分土壤孔隙，使通气受阻，有机碳的矿化率低，有利于有机碳的积累。氮素是保证植被生长和改善土壤质量的重要矿质元素，土壤中氮主要以有机态存在，一般占全氮含量的 95% 以上，土壤全氮含量的消长取决于土壤有机质含量的变化，与土壤有机质含量存在正相关关系。此外，土壤碳氮比被认为是土壤氮素矿化能力的重要标志<sup>[37]</sup>，较低的碳氮比有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放，而植物组织中的碳氮比又直接决定植物残体和凋落物分解进入土壤的量和速率。输入土壤的凋落物量和分解速率的改变将引起土壤碳氮比的变化，从而影响土壤微生物的呼吸和土壤 CO<sub>2</sub> 的释放<sup>[38]</sup>，进而影响土壤有机碳的积累。土壤 pH 值是土壤的一个基本性质，也是影响土壤理化性质的一个重要化学指标，它直接影响着土壤中各种元素的存在形态、有效性及迁移转化<sup>[39]</sup>。已有研究表明<sup>[40-42]</sup>，强酸性土壤环境能使土壤微生物活性减弱，降低其分解、运移土壤有机质及营养元素的能力，从而使土壤有机碳周转下降，有利于有机碳的积累。

综上所述，研究区域内土壤有机碳含量与温度、降水、海拔、坡度、土壤体积质量、土壤含水量、土壤全氮含量和土壤 pH 值之间均存在一定的关系，但影响土壤有机碳含量的关键因素随土壤深度和土地利用类型的不同而有所不同。影响 0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳含量的主要因素为土壤全氮含量 > 土壤体积质量 > 土壤 pH 值，而 10 ~ 20 cm 土层为土壤全氮含量

> 土壤体积质量 > 坡度，20 ~ 40 cm 土层则为土壤全氮含量 > 年降水量。影响不同土地利用类型土壤有机碳含量的主要因素，草地和农田均为土壤全氮含量 > 年平均温度，落叶松林为土壤全氮含量 > 土壤含水量，油松林为土壤体积质量 > 土壤全氮含量 > 土壤 pH 值，杨桦林和辽东栎林均为土壤全氮含量 > 土壤体积质量，而灌丛则为土壤 pH 值。

总而言之，土壤有机碳含量是气候、地形、植被、土壤理化性质等自然条件以及土地利用、耕作管理等人类活动综合作用的结果，且各种自然和人为因子之间存在强烈的互作效应。要深入了解密云水库上游流域土壤有机碳蓄积过程及其关键因子的作用机理，还需对影响土壤有机碳的其他因子如区域内植被盖度和植被生产力等植被特征因子以及森林采伐、草地刈割、放牧、农田耕种、施肥、灌溉等人为因素进行更加深入细致的研究，将各种影响因素有机地结合起来，从而对密云水库上游流域土壤有机碳储量及其动态平衡作出更加准确的评估。

**致谢：** 感谢中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室罗云建、张千千、杨乐同学在野外采样期间的辛勤工作以及中国科学院生态环境研究中心北京城市生态站肖钦同志在实验室分析工作中的积极协作。

#### 参考文献：

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate Change and food security. *Science*, 2004, 304: 1 623-1 627
- [2] Falkowski P, Scholes RJ, Boyle E. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 2000, 290: 291-296
- [3] Doran JW, Jones AJ, Arshad MA. Determinants of Soil Quality and Health, Soil Quality and Soil Erosion. Boca Raton, USA: CRC Press, 1999: 17-36
- [4] Bird MI, Veenendaal EM, Lloyd JJ. Soil carbon inventories and  $\delta^{13}\text{C}$  along a moisture gradient in Botswana. *Global Change Biology*, 2004, 10: 342-349
- [5] Scholes RJ, Noble IN. Storing carbon on land. *Science*, 2001, 294: 1 012-1 013
- [6] Percival HJ, Roger LP, Scott NA. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: Is clay content important? *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1 623-1 630
- [7] 张东辉, 施明恒, 金峰, 杨浩. 土壤有机碳转化与迁移研究概况. *土壤*, 2000, 32(6): 305-309

- [8] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517
- [9] Zhou CH, Zhou QM, Wang SQ. Estimating and analyzing the spatial distribution of soil organic carbon in China. *Ambio*, 2003, 32(1): 6-12
- [10] Wang SH, Tian HQ, Liu JY. Pattern and change of soil organic carbon storage in China, 1960s-1980s. *Tellus*, 2003, 55: 416-427
- [11] 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. 环境科学, 2008, 29(10): 2879-2884
- [12] 李典友, 潘根兴, 陈良松, 李军. 安徽六安市表层土壤有机碳的空间分布及尺度变异分析. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 37-41
- [13] 郭然, 王效科, 刘康, 杨帆. 樟子松林下土壤有机碳和全氮储量研究. 土壤, 2004, 36(2): 192-196
- [14] 杨长明, 欧阳竹. 华北平原农业土地利用方式对土壤团聚体分布特征及其有机碳含量的影响. 土壤, 2008, 40(1): 100-105
- [15] 刘咏梅, 江南. 太湖流域典型地区农田土壤有机碳变化状况研究. 土壤, 2009, 41(5): 715-718
- [16] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599
- [17] 史军, 刘纪远, 高志强, 崔林丽. 造林对土壤碳储量影响的研究. 生态学杂志, 2005, 24(4): 410-416
- [18] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 王小利, 杨光. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97-105
- [19] 张秀玲, 李君剑, 石福臣. 速生杨人工林对土壤碳氮含量及微生物生物量的影响. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 32-35
- [20] Priess JA, Koning GHJDE, Veldkamp A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2001, 85(1/3): 269-279
- [21] Grandy AS, Robertson GP. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems*, 2007, 10: 58-73
- [22] Zhang JB, Song CC, Yang WY. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fractions through soil profiles. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 660-667
- [23] Martens DA, Reedy TE, Lewis DA. Soil organic carbon content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use managements. *Global Change Biology*, 2003, 10: 65-78
- [24] Jiang PK, Xu QF, Xu ZH. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236: 30-36
- [25] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. 地球科学进展, 2006, 21(2): 138-143
- [26] 迟光宇, 王俊, 陈欣, 史奕. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化. 土壤, 2006, 38(6): 755-761
- [27] Jobbagy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, 2002, 10(2): 423-436
- [28] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, 32(1): 11-18
- [29] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228
- [30] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉, 蒋定安, 黄洪光. 近 20 年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素. 第四纪研究, 2004, 24(2): 236-242
- [31] Davidson EA, Trumbore SE, Amundson R. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 2000, 408(14): 789-790
- [32] 黄昌勇主编. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 36-37
- [33] 毕珍, 石辉, 许五弟, 刘兴良. 四川盆地森林土壤的有机碳储量及其空间分布特征. 水土保持研究, 2009, 16(5): 83-87
- [34] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素. 应用生态学报, 2009, 20(3): 518-524
- [35] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 何洪林, 张文娟, 王伯伦, 陈庆美, 吴志峰. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析. 资源科学, 2006, 28(2): 97-103
- [36] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 万长贵. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476
- [37] Bonito GM, Coleman DC, Haines BL. Can nitrogen budgets explain differences in soil nitrogen mineralization rates of forest stands along an elevation gradient? *Forest Ecology and Management*, 2003, 176: 563-574
- [38] 彭少麟, 李跃林, 任海, 赵平. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705-713
- [39] 南京农学院土化系译. 布雷迪 NC 著. 土壤的本质与性状. 北京: 科学出版社, 1982
- [40] Baath E, Berg B, Lohm U. Effects of experimental acidification and liming on soil organisms and decomposition in a Scots pine forest. *Pedobiologia*, 1980, 20: 85-100
- [41] Ayanaba A, Jenkinson DS. Decomposition of carbon-14 labeled ryegrass and maize under tropical conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 112-115
- [42] Boruvka L, Mladkova L, Drabek O. Factors controlling spatial distribution of soil acidification and Al forms in forest soils. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2005, 99: 1796-1806

## Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon in Upstream Watershed of Miyun Reservoir in North China

WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Soil organic carbon (SOC) pool constitutes an important portion of the global carbon pool and has significant impacts on land productivity and global climate change. The study on soil organic carbon has been one of the hot issues of the world. However, related research of the filed in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, the largest reservoir in North China, is relatively rare. The distribution characteristics and influencing factors (such as climate, topography and soil characteristics) of soil organic carbon in seven kinds of typical land use types of the Upstream Watershed of Miyun Reservoir were analyzed in the study, and the results showed as follows. 1) In the target domain, soil organic carbon contents in natural secondary forests and grasslands were much higher than those in shrubs and artificial forests, while that in croplands was the lowest. In the whole soil profile (0 - 40 cm), the average soil organic carbon content was in order of natural secondary *Populus davidiana* Dode-*Betula platyphylla* Suk. mixed forest > grassland > natural secondary *Quercus wutaishanica* Blume forest > shrub > artificial *Larix principis-rupprechtii* Mayr. forest > artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forest > cropland. 2) Soil organic carbon contents in the top soil layer (0 - 10 cm) were the highest and decreased rapidly with the increase depth in the six kinds of land use types except grassland, which showed a slight increase from 0 to 20 cm and a small drop from 20 to 40 cm in depth. 3) Soil organic carbon content in each layer was significantly positively correlated with altitude, soil water content and nitrogen content ( $p < 0.01$ ), but remarkably negatively correlated with annual mean temperature, annual precipitation, soil bulk density and pH ( $p < 0.01$ ). In addition, soil organic carbon content showed a little positive correlation with slope ( $p > 0.05$ ). Further partial correlation analysis indicated that the most principal factors influencing soil organic carbon content varied with soil depth, and they were soil nitrogen content, bulk density and pH in the 0 - 10 cm layer, soil nitrogen content, bulk density and slop in the 10 - 20 cm layer, soil nitrogen content and annual precipitation in the 20 - 40 cm layer, respectively. 4) Furthermore, the most significant factors influencing soil organic carbon content also varied with land use types, and they were soil nitrogen content and annual mean temperature in grassland and cropland, soil nitrogen content and water content in artificial *Larix principis-rupprechtii* Mayr. forest, soil bulk density, nitrogen content and pH in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forest, soil nitrogen content and bulk density in natural secondary *Populus davidiana* Dode-*Betula platyphylla* Suk. mixed forest and natural secondary *Quercus wutaishanica* Blume forest, and only pH in shrub, respectively.

**Key words:** Upstream Watershed of Miyun Reservoir, Soil organic carbon content, Land use type, Soil layer, Influencing factor