

九寨沟和黄龙自然保护区原始林与次生林土壤物理性质比较*

庞学勇^{1,2} 包维楷^{1**} 江元明^{1,2} 王成^{1,2}

(¹中国科学院成都生物研究所 生态恢复重点实验室 成都 610041)

(²中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 森林土壤的结构和贮水保水能力是决定土壤水分及其时空分布的关键,九寨沟和黄龙自然保护区均是以水为灵魂,其水量的多少及时空分布格局对景区景点的视觉观赏效果具有十分重要的作用.通过对九寨沟和黄龙核心区原始林与次生林土壤容重、持水性能和孔隙度等指标的监测,探讨了不同植被类型下土壤结构及持水能力状况.结果表明:(1)由于较早地得到保护,九寨沟景区原始林、桦木次生林土壤物理性质均优于四川西部其它同类型植被,与此相反,人工云杉纯林土壤物理性质明显劣于其它植被类型,可能主要与云杉平根系统对土壤膨胀挤压和单优势乔木群落所形成的不利微气候影响有机物分解归还土壤有关;(2)在黄龙核心景区的原始云、冷杉林,发育于坡积母质的土壤物理性质明显优于发育于钙华母质上的土壤物理性质.图3表1参31

关键词 土壤物理性质;植被类型;容重;持水性能;孔隙度;九寨沟自然保护区;黄龙自然保护区
CLC S714.2 (271)

Comparison of Soil Physical Properties under Primary and Secondary Forests in Jiuzhaigou and Huanglong Nature Reserves, Sichuan, China*

PANG Xueyong^{1,2}, BAO Weikai^{1**}, JIANG Yuanming^{1,2} & WANG Cheng^{1,2}

(¹ECORES Lab, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Forest soil structure and water-holding capacity are key factors controlling soil water, and its temporal and spatial distribution. The Jiuzhaigou and Huanglong nature reserves in Sichuan, China are famous for their wonderful water areas. Therefore, water quantity and its pattern of temporal and spatial distribution there are quite important to attract visitors' eyes. The soil bulk density, water-holding capacity and soil porosity were investigated to study the structure and water-holding status of soil in main vegetation types of core areas of the Jiuzhaigou and Huanglong natural reserves. The results showed that: (1) Due to early protection in Jiuzhaigou, soil physical properties in primary forest and birch-maple secondary forest were better than those in the same vegetation types in other regions of western Sichuan, while the soil under pure spruce plantation was compacted and had lower water-holding capacity, which was perhaps caused by the flat root system extruding soil and unfavorable microclimate condition inhibiting the decomposition of organic matter in soil; (2) Under primary spruce and fir forest, soil physical properties were better in parent material of slope deposits than in parent material of calcified deposits in the Huanglong Nature Reserve. Fig 3, Tab 1, Ref 31

Keywords soil physical property; vegetation type; bulk density; water-holding capacity; porosity; Jiuzhaigou Nature Reserve; Huanglong Nature Reserve

CLC S714.2 (271)

森林植被对维持区域乃至全球生态平衡、保护人类生存和发展的大环境起着不可替代的作用.森林生态系统丰富的层次结构(乔木层、灌木层、草本层和土壤层)能截留和蓄储大气降水^[1],从而对大气降水进行重新分配和有效调节,减少地表径流等,是森林生态系统重要的水源涵养和水土保持功能^[2].林下土壤层是森林生态系统养分、水分需求的重要来源保障,是降雨通过林冠截留和枯枝落叶层截留后的第3个主要作用层,是森林生态系统中最为重要的界面,对降雨的分配调节功能非常强大,相关研究表明,林地土壤是森林涵养水源的主要场所^[1,3-4].据研究,土壤层截水量约占整个森林生态系统同期截水量的50%以上^[1].森林土壤把经过枯枝落叶层渗入到土壤内的降水一部分储存在毛管孔隙内,用于树木和其它植物生命活动,一部分转化成壤中流或深层潜流,在水分自身重力作用下以泉水露头或潜流的形式补给沟谷或河川.所以,森林土壤对降水的吸收、储存、转化是一个极其复杂的过程,不同土壤类型吸收、储存、转化水分的能力有较大的差异.然而,已有大量的研究表明,不同的森林

持功能^[2].林下土壤层是森林生态系统养分、水分需求的重要来源保障,是降雨通过林冠截留和枯枝落叶层截留后的第3个主要作用层,是森林生态系统中最为重要的界面,对降雨的分配调节功能非常强大,相关研究表明,林地土壤是森林涵养水源的主要场所^[1,3-4].据研究,土壤层截水量约占整个森林生态系统同期截水量的50%以上^[1].森林土壤把经过枯枝落叶层渗入到土壤内的降水一部分储存在毛管孔隙内,用于树木和其它植物生命活动,一部分转化成壤中流或深层潜流,在水分自身重力作用下以泉水露头或潜流的形式补给沟谷或河川.所以,森林土壤对降水的吸收、储存、转化是一个极其复杂的过程,不同土壤类型吸收、储存、转化水分的能力有较大的差异.然而,已有大量的研究表明,不同的森林

收稿日期: 2008-12-10 接受日期: 2009-03-10

*国家“十一五”科技支撑计划项目(No. 2006BAC01A15)、国家自然科学基金(No. 40701181)和中国科学院领域前沿创新项目(No. CIB-2007-LYQY-02)共同资助 Supported by the Key Project of the National 11th Five-year Plan Science & Technology Program of China (No. 2006BAC01A15), the National Natural Science Foundation of China (No. 40701181) and the Forefront Project of Chinese Academy of Sciences (No. CIB-2007-LYQY-02)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: baowk@cib.ac.cn)

植被类型土壤层持水保水能力有相当大的差别^[5-6], 即使在同一类植被类型下, 因土壤母质等的差异也有明显的不同^[3]。

九寨沟-黄龙世界自然遗产地的生物多样性及水质已有了大量的研究, 但涉及土壤的研究十分少。20世纪90年代, 林致远和尹平从成土条件与土壤类型特性、组成的相互关系报道了九寨沟自然保护区的土壤本底资料^[7], 李玉武等研究了人为干扰对九寨沟核心景区土壤物理性质的影响^[8], 之后有关九寨沟-黄龙景区的土壤研究少有报道。土壤作为森林生态系统的-一个重要组成部分, 研究土壤的结构与贮水保水能力对于理解森林生态系统水分分配及过程具有十分重要的作用。九寨沟风景区在早期经过人为砍伐, 形成了一系列次生植被, 这些次生植被的贮水保水能力是否有差别; 黄龙景区森林植被虽然未遭受人为大规模砍伐, 但森林植被发育的母质存在差异, 这些差异在多大程度上影响到土壤的贮水保水能力, 已有的研究较少有报道。

九寨沟自然保护区是以水为灵魂的景区, 其水量的多少及时空分布格局对景区各景点的视觉观赏效果起着十分重要的作用。森林土壤的结构及贮水保水能力是维系土壤水分和时空分布的关键, 所以本研究以九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型下土壤物理结构及持水保水能力为核心, 比较各植被类型下土壤物理性质的差异, 试图探讨核心景区主要植被类型下土壤的持水能力状况, 以期对九寨沟-黄龙景区植被的健康管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于四川省西北部阿坝藏族羌族自治州九寨沟县境内的九寨沟自然保护区(103°46'~104°4'E, 32°51'~33°19'N)和松潘县黄龙自然保护区(103°44'~104°04'E, 32°39'~32°54'N)内。

九寨沟研究点海拔约为3 000 m, 区域内原始植被均为冷、云杉林, 林下灌木种类丰富但稀疏, 有杜鹃(*Rhododendron* spp.)、蔷薇(*Rosa* spp.)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、小檗(*Berberis* spp.)、细枝绣线菊(*Spiraea myrtilloides*)等。草本植物总盖度30%~45%, 数量较多的有东方草莓(*Fragaria orientalis*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、高原露珠草(*Circaea alpina* subsp. *imaicola*)、多种苔草(*Carex* spp.)和蕨类等。地表苔藓植物发达, 优势种有大羽藓(*Thuidium cymbifolium*)、塔藓(*Hylocomium splendens*)和锦

丝藓(*Actinothuidium hookeri*)等。年均气温7.1℃, 最高温度30.3℃, 最低温度-17℃, 年降雨量696.6~957.5 mm, 积雪期从10月至次年4月^[9]。林下土壤为暗棕壤, 腐殖质含量很高。

黄龙海拔约为3 600 m, 属典型的高原温带-亚寒带季风气候, 年平均降雨量758.9 mm, 5~9月的降雨量占全年的70%~73%。主要植被类型为针阔叶混交林及针叶林^[10]。主要乔木树种有紫果云杉(*Picea purpurea*)、岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、糙皮桦(*Betula utilis*)、黄果冷杉(*A. ernestii*); 灌木层主要有金露梅、细枝绣线菊、湖北花楸(*Sorbus hupehensis*)、西南樱桃(*Prunus pilosiuscula*)、峨眉蔷薇(*R. omeiensis*)、四子柳(*Salix tetrasperma*)、茶藨子(*Ribes* sp.)、刺黄花(*Berberis polyantha*)及忍冬(*Lonicera* sp.)。草本层除兰科植物外, 主要有糙野青茅(*Deyeuxia scabrescens*)、圆穗蓼(*Polygonum sphaerostachyum*)等^[10-11]。土壤主要为钙华土及山地暗棕壤^[10]。

1.2 研究样地的选取

九寨沟植被在20世纪70年代被大规模地人为采伐, 区域的原始植被遭受到一定程度的破坏, 由此形成了大面积的次生林。在次生林中, 一部分经过人工再造林, 主要以人工云杉林为主, 另一部分未经过人为管理而自然恢复形成的次生植被, 较早采伐地上形成的次生植被已恢复成林, 而较晚采伐的迹地上仍以次生灌丛为主。本研究在九寨沟核心景区内选择有代表性的次生植被(次生灌丛、桦木次生林和人工云杉林), 以原始冷云杉林为对照, 试图比较各植被类型下土壤物理性质的变化。各样地的基本背景情况见表1。

黄龙核心景区植被虽未遭受大规模的人为采伐, 但原始冷云杉林发育的土壤母质存在明显差异, 在宽阔的沟谷上发育的土壤, 母质为钙华沉积物, 而在邻近的坡体上则主要是以变质岩坡积物母质。本研究选择邻近的两种母质上发育的原始冷云杉林, 试图比较两母质上发育的原始冷云杉林土壤物理性质的差异; 各样地的基本背景情况见表1。

1.3 土壤采样与分析

在上述每一选择的样地内, 设置3个20 m×20 m的植被调查样方(人工林样方为10 m×10 m), 在记录环境背景的基础上, 分乔木、灌木、草本和苔藓层分别进行植物样方调查。在样方的中部, 选择有代表性的地点, 挖取一个土壤剖面, 按0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm取样(环刀法), 每层次重复3次, 以测定土壤容重、孔隙度及持水特性, 测定方法见《土壤理化分析》^[12], 在环刀取样附近用铝盒取约20 g土壤用于含

表1 九寨沟黄龙核心景区主要植被类型的基本特征

Table 1 Characteristics of main vegetation types in the core areas of the Jiuzhaigou and Huanglong nature reserves

地点 Site	样地类型 Forest stand	海拔 Altitude (h/m)	坡度 Slope (α /°)	坡向 Aspect (β /°)	母质类型 Parent material	基径 Diameter at 50 height (d/cm)	平均高度 Average height (h/m)	密度 Density (n/stem hm ⁻²)	郁闭度 Canopy
九寨沟 Jiuzhaigou	PF	3098	15	NW30	SM	28.5	19.2	1121	0.85
	SF	3019	24	NE30	SM	—	1.83	—	—
	BM-SF	2972	25	NW70	SM	9.2	7.2	1725	0.89
	SP	2938	13	NE89	SM	14.3	11.2	3400	0.92
黄龙 Huanglong	PFC	3235	3	NW50	CD	24.2	13.9	1033	0.73
	PFS	3273	33	NE20	SM	26.3	13.0	958	0.63

PF: 原始林; SF: 次生林; BM-SF: 桦木-槭树次生林; SP: 人工云杉林; PFC: 钙华体上原始林; PFS: 坡积体上原始林; SM: 坡积物; CD: 钙化沉积物。下同
PF: Primary forest; SF: Secondary forest; BM-SF: Birch-maple secondary forest; SP: Spruce plantation; PFC: Primary forest on calcified deposits; PFS: Primary forest on slope deposits; SM: Slope deposits; CD: Calcified deposit. The same below

水量的测定,同时每个层次用布袋取土样1 000 g左右,用于化学性质分析.

1.4 统计分析

方差分析(One-ANOVA)用于各林型之间土壤容重、孔隙度和持水性能差异分析,用Duncan检验进行多元比较.

2 结果

2.1 土壤容重

九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型土壤容重存在明显差异($P<0.000$) (图1). 其中在九寨沟核心景区,人工云杉林土壤容重最大,明显高于原始林和其它次生植被,而桦木次生林明显低于其它植被类型. 从剖面的深度上看,表层土壤容重低于表下层,但只有桦木次生林与人工云杉林土壤容重在深度上存在差异(图1).

黄龙核心景区植被未遭受人为大规模砍伐,所以植被的主要类型为原始的云、冷杉林,引起土壤容重差异主要原因可能在于母质的差异. 在同样的原始植被类型下,发育于钙化母质上的原始林土壤容重明显大于坡积土母质上的原始冷、云杉林下土壤容重. 在土壤容重垂直差异上,与九寨沟核心区植被类型一样,表层土壤容重明显低于底层(图1).

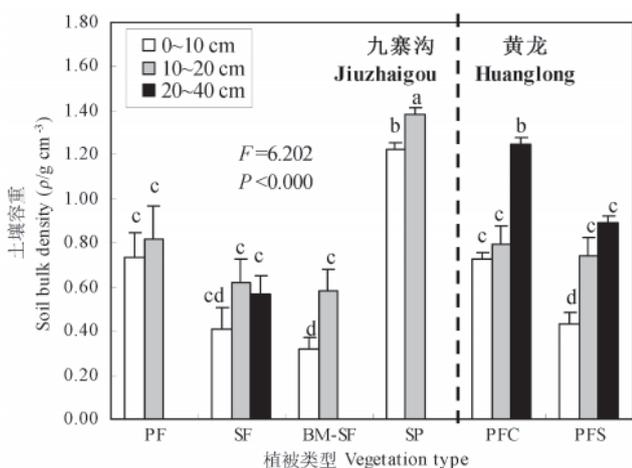


图1 九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型土壤容重

Fig. 1 Soil bulk density of main vegetation types in core areas of the Jiuzhaigou and Huanglong nature reserves

不同字母代表有显著差异($P<0.05$)

Different letters indicate significant difference ($P<0.05$)

2.2 土壤孔隙度

土壤孔隙是土壤持水保水能力的首要保障. 九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型土壤总孔隙存在明显的差异($P<0.000$) (图2-A), 其趋势与土壤容重相反. 在九寨沟核心景区,人工云杉林由于土壤容重大,土壤紧实,总孔隙明显小于其它植被类型. 而在黄龙核心景区,钙华体上土壤总孔隙明显地小于坡积土壤总孔隙,可能主要与钙积土以结晶的矿物颗粒为主,有机无机复合团聚体少有关,可以从它们毛管孔隙存在差异(图2-B),而非毛管孔隙没有明显差异得到证实(图2-C).

九寨沟核心景区人工云杉林土壤毛管孔隙明显地低于其它各植被类型,黄龙核心景区钙华体上土壤毛管孔隙低于

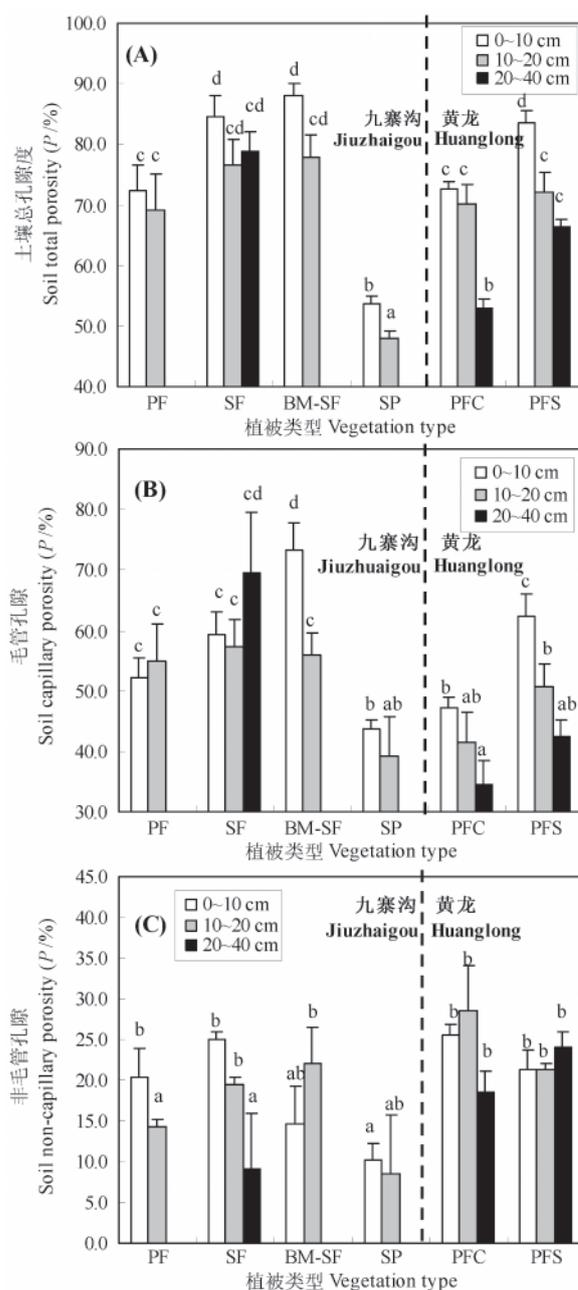


图2 九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型下土壤总孔隙(A)、毛管孔隙(B)和非毛管孔隙(C)

Fig. 2 Soil total porosity (A), capillary porosity (B) and non-capillary porosity (C) of main vegetation types in core areas of the Jiuzhaigou and Huanglong nature reserves

坡积土(图2-B). 非毛管孔隙除九寨沟核心景区人工云杉林明显地低于其它各植被类型外,其它各植被类型之间没有明显差异(图2-C).

2.3 土壤持水性能

九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型土壤饱和和持水量总体含量均较大,但存在明显的差异($P<0.000$) (图3-A),其趋势与土壤总孔隙相似. 在九寨沟核心景区人工云杉林土壤饱和和持水量明显地低于其它植被类型,其它各植被类型之间,在同一土壤层饱和和持水量没有明显的差异. 而在黄龙核

心景区, 钙华体上土壤表层饱和和持水量小于坡积土壤饱和和水量, 下土层(10~20 cm和20~40 cm层)没有明显差异。

土壤毛管持水量与土壤饱和和持水量有相似的趋势(图3-B), 九寨沟核心景区人工云杉林土壤毛管持水量明显低于次生桦木-槭树林, 其它各植被类型之间没有明显差异, 在同一土层, 次生植被土壤毛管持水量略大于原始林, 但没有显著性差异($P>0.05$)。黄龙核心景区钙华体上表层土壤毛管持水量低于坡积土(图3-B), 下层土壤之间没有明显差异。

土壤非毛管孔隙在九寨沟-黄龙核心景区各植被类型间存在明显差异(图3-C), 九寨沟核心景区人工云杉林明显

地低于其它各植被类型, 其它各植被类型之间没有明显差异(图3-C)。在黄龙核心景区, 钙华体上层土壤非毛管持水量低于坡积土(图3-B), 下层土壤之间没有明显差异。

3 讨论

土壤物理性质通常被认为是重要的土壤结构和土壤质量指标^[13-15]。一般来说, 土壤结构支配着土壤物理性质以及其它的功能^[16], 结构的退化通常意味着土壤总孔隙减少或孔隙的连贯性降低^[17], 对土壤的通气性或水文特性有负面的影响^[18], 进而影响土壤含水量和植物生长, 因此土壤结构在评判植被恢复与生态系统健康, 特别是在由于人为等原因造成植被类型转换后的土壤生态功能等方面具有重要的指示作用。

九寨沟原始植被的土壤容重为 (0.73 ± 0.11) g/cm³, 次生桦木-槭树林为 (0.32 ± 0.05) g/cm³(图1), 与王晶等在九寨沟保护区的研究结果^[31]一致, 与该区域同类型的其它植被土壤物理性质比较, 九寨沟各植被类型土壤物理性质均较优。如土壤容重略低于同属高山峡谷区的米亚罗云冷杉原始林 $[(0.89\pm 0.10)$ g/cm³], 次生桦木林为 (0.75 ± 0.08) g/cm³^[3-4], 可能主要原因为九寨沟自然保护区较早得到保护, 少为人干扰。与此相对照, 九寨沟30 a左右人工云杉林土壤物理性质比米亚罗人工云杉林差, 如土壤容重大约增加了28%, 主要与人工云杉林密度有关, 九寨沟人工林密度(3 400 株/hm²)明显大于米亚罗人工林密度。土壤孔隙度和持水性能也都表现出九寨沟自然保护区各植被类型优于该区域同类型的其它植被趋势。土壤紧实度、孔隙度和持水性能受多方面的因素影响^[3-4, 13, 18], 主要分为生物因素和非生物因素。在九寨沟核心景区样地选取上, 我们主要控制了非生物因素, 如海拔、坡度、坡向以及土壤母质等因素大体一致, 而在黄龙自然保护区样地选取上, 我们控制了生物因素(地上植被类型)基本一致, 主要的差异为成土母质。

3.1 植被类型的影响

植被类型可以通过一系列性质来影响土壤性质, 如碎屑物的输入^[19], 地上与地下生物量的分配^[20], 土壤根系的分布深度^[21], 对微气候的影响^[19], 再分配养分的能力^[22], 固氮的能力^[23], 对土壤碳氮矿化^[24]以及无脊椎动物种群的影响等^[25-26]。任何影响输入碎屑物的数量、位置和可降解性都可能通过影响土壤有机碳的数量和周转来影响土壤的特性^[27], 因为土壤有机碳将造成土壤养分供应和土壤理化特性明显变化。

原始林砍伐后种植人工林增加了土壤紧实度(图1), 据许多研究^[3-4]表明, 不合理的造林密度及管理措施是人工林土壤结构退化的主要原因, 据调查, 在九寨沟人工云杉林地密度可达3 400 株/hm²(表1), 有的甚至可达6 000 株/hm²。本研究中, 人工云杉林土壤有机质含量最低, 原始林有机质含量最高, 而次生林和桦木-槭树次生林含量略低于原始林(数据略)。高密度乔木层形成单优势群落结构, 造成了许多不利于凋落物分解归还有机物的因素^[3-4], 如阴湿的环境、低温和低光照, 同时还引起土壤微生物、动物和酶活性降低。这些不利的生物和非生物因素共同调控着地上有机物向土壤转移。同时, 在相同的气候条件下, 云杉针叶分解速率明显低

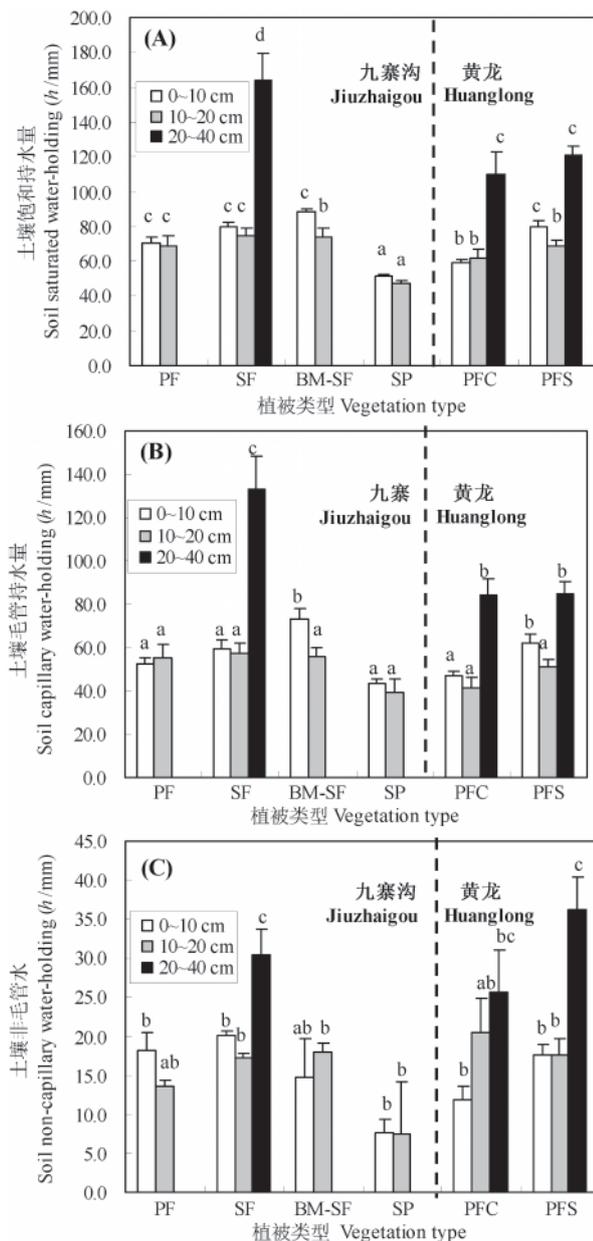


图3 九寨沟-黄龙核心景区主要植被类型下土壤饱和和持水量(A)、毛管持水量(B)和非毛管持水量(C)

Fig. 3 Soil saturated water-holding capacity (A), capillary water-holding capacity (B) and non-capillary water-holding capacity (C) of main vegetation types in core areas of the Jiuzhaigou and Huanglong nature reserves

于阔叶树也是造成人工云杉林土壤有机质含量低的另一原因。据Russell等研究,土壤容重与土壤有机质有明显的负相关关系,在人工林下凋落物分解速率下降,势必会造成土壤有机质降低^[27]。有机质的主要作用在于联结矿物质粘粒,形成多孔介质的团聚体,基含量与土壤容重呈负相关,与孔隙度呈正相关^[3, 27, 30],因而土壤有机质含量通常用来估计土壤孔隙度,所以,土壤有机质含量高低决定了土壤的持水性能。本研究中,人工云杉林土壤有机质含量最低,减少了矿物颗粒与其结合的可能性,从而间接增大了土壤容重,增加土壤的紧实度。而原始林砍伐后通过封山育林等保护措施恢复的自然次生植被,由于其物种组成以阔叶树为主,其分解速率明显高于以云、冷杉为主的针叶树,增加大了有机物向土壤输入,从而间接地减少了土壤容重。

另外,云杉被公认为是一个平根系树种,根系分布浅,与其它针叶树和多数落叶树种相比,具有较低的穿透性^[28]。有研究认为云杉平根系统可能引起土壤紧实,对土壤通气性和水文特性有负作用,进而影响到土壤质量和早期树木生长和幼苗的建立^[18, 28]。本研究中云杉人工纯林的成林密度(3 400株/hm²)为原始林和次生阔叶林的2倍(表1),可以估计其根系的数量和体积也明显地大于原始林和次生阔叶林,所以,根系膨胀和挤压也是造成土壤紧实的一个主要原因,同时,这也会造成土壤孔隙减少,特别是大孔隙数量明显减少,进而影响到土壤通透性和根系的穿透性。

3.2 土壤母质的影响

在黄龙自然保护区,同为冷杉、云杉原始林,发育于坡积土上土壤物理性质明显优于发育于钙华母质上的(图1、2和3),差异的主要原因可能与土壤的发育时间及母质本身特性有关。黄龙钙华体形成主要是富含Ca(HCO₃)₂的地下水通过深部循环后出露地表,在温度、压力、水动力等因素综合的影响下,水中的碳酸钙沉积下来,形成钙华塌陷、钙华滩流、钙华瀑布等独特的露天喀斯特堆积地貌景观,但随着时间的推移,沉积下来的钙华体抬高河床,造成流水改道,致使原来的河床出露地表,形成以碳酸钙为主要成份的母质^[29]。在母质的特性上,钙化母质十分坚硬,明显可以看到母质的原貌。钙积土由于成土时间比较短,生物作用十分弱,以结晶的矿物颗粒为主,土壤有机质含量低,与有机无机复合团聚体少有关,可以从它们毛管孔隙存在差异(图2-B),而非毛管孔隙没有明显差异得到证实(图2-C),相关研究表明有机无机复合团聚体多时土壤毛管孔隙含量较大^[3-4]。在黄龙核心区原始林少有人为干扰情况下,钙化体上土壤毛管孔隙低于坡积土(图2-B),也可以部分证实了土壤紧实并非践踏等人为原因所致,而是由于土壤母质本身差异引起的。两类不同母质上发育的土壤物理性质,从土壤厚度上也存在明显的差异,坡积土厚度远远大于钙化土,说明坡积土发育的时间远远大于钙华母质上发育的土壤。

总之,尽管黄龙自然保护区坡积土地形条件较钙华母质土壤差,但土壤物理性质坡积土壤明显优于钙华母质上发育的土壤。在九寨沟自然保护区除人工云杉林外,其它主要植被类型土壤物理性质均优于该区域同类型植被,但人工云杉纯林土壤物理性质劣于该区域其它植被类型,表现为土

壤容重大,结构结实,孔隙度低,持水能力下降,同时由于密度较大,在部分地点有落针病发生,严重影响了保护区的风景,加强该区域低效人工云杉林改造,降低其密度,增加下层植被的透光率,改善微环境条件,提高生态功能是有有效的措施之一。

致谢 感谢中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室和四川省生态恢复与生物多样性保育重点实验室对本研究的支持。

References

- Bao W (鲍文), Bao WK (包维楷), He BH (何丙辉), Ding DR (丁德蓉). Interception effect of precipitation by litter and soil under 23-year artificial *Pinus tabulaeformis* forest in upper reaches of Minjiang River. *J Soil Water Conser* (水土保持学报), 2004, **18** (5): 115~119.
- Chang ZY (常志勇), Bao WK (包维楷), He BH (何丙辉), Yang YC (杨以翠), He QH (何其华). Interception and distribution effects of mixed artificial *Pinus tabulaeformis* and *Pinus armandi* forests on precipitation in the upper reaches of Minjiang River. *J Soil Water Conser* (水土保持学报), 2006, **20** (6): 37~40.
- Pang XY (庞学勇), Bao WK (包维楷), Zhang YM (张咏梅), Leng L (冷俐), Yuan ZZ (袁志忠). Geographical comparison of soil physical properties under *Cupressus chengiana* forests. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2004a, **10** (5): 596~601.
- Pang XY (庞学勇), Liu Q (刘庆), Liu SQ (刘世全), Wu Y (吴彦), Lin B (林波), He H (何海), Zhang ZJ (张宗锦). Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in Western Sichuan. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004b, **24** (2): 261~267.
- Mahe G, Paturol JE, Servat E, Conway D, Dezetter A. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *J Hydro*, 2005, **300**: 33~43.
- Zhang YD, Liu SR, Ma JM. Water-holding capacity of ground covers and soils in alpine and sub-alpine shrubs in western Sichuan, China. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (9): 2775~2781.
- Lin ZY (林致远), Yin P (尹平). Studies on the soil genetic characteristics and geographical distribution in Jiuzhaigou region. *J SW Chin Normal Univ Nat Sci* (西南师范大学学报自然科学版), 1994, **19** (1): 90~99.
- Li YW (李玉武), Bao WK (包维楷), Pang XY (庞学勇), Zhu Z (朱珠), Wang J (王晶). The impact of human disturbance on soil ecological function of Jiuzhaigou Valley. I. On soil physical properties. *Chin Popul Res Environ* (中国人口资源与环境), 2006, **16**: 319~322.
- Li X (李西), Luo CD (罗承德), Liao XB (廖心北). Humble opinion about vegetation restoration and reconstruction by the highway slope in Jiuzhaigou Valley. *Sichuan Caoyuan* (四川草原), 2003, **17** (4): 17~18.
- Ran JH (冉江洪), Liu SY (刘少英). Scientific Expedition of Huanglong Nature Reserve, Sichuan. Chengdu, China (成都): Sichuan Forestry Press, 2002.
- Li P (李鹏), Tang SY (唐思远), Dong L (董立), Luo YB (罗毅波), Kou Y (寇勇), Yang XQ (杨小琴), Holger P. Species diversity and flowering phenology of Orchidaceae in Huanglong Valley, Sichuan. *Biodiv Sci* (生物多样性), 2005, **13**: 255~261.
- 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版

- 社, 1978
- 13 Karlen DL, Stott DE. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Stewart BA eds. *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publications, Vol. 35. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1994. 53~72
- 14 Arshad MA, Lowery B, Grossman B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran JW, Jones AJ eds. *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publications, Vol. 49. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1996. 123~141
- 15 Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson AC, Soriano-Soto MD. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*, 2001, **44**: 47~67
- 16 Dexter AR. Physical properties of tilled soils. *Soil Till Resear*, 1997, **43** (1~2): 41~63
- 17 Dias ACCP, Northcliff S. Effects of two land clearing methods on the physical properties of an Oxisol in the Brazilian Amazon. *Tropi Agricul*, 1985, **62**: 207~212
- 18 Berger TW, Hager H. Physical top soil properties in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *For Ecol Manage*, 2000, **136**: 159~172
- 19 Montagnini F, Ramstad K, Sancho F. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous tree species in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Agrofor Syst*, 1993, **23**: 39~61
- 20 Cuevas E, Brown S, Lugo AF. Above- and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest. *Plant Soil*, 1991, **135**: 257~268
- 21 Carvalheiro KD, Nepstad DC. Deep soil heterogeneity and fine root distribution in forests and pastures of eastern Amazonia. *Plant Soil*, 1996, **182**: 279~285
- 22 Alban DH. Effects of nutrient accumulation by aspen, spruce, and pine on soil properties. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, **46**: 853~861
- 23 Roggy JC, Prévost MF, Gourbiere F, Casabianca H, Garbaye J, Domenach AM. Leaf natural ¹⁵N abundance and total N concentration as potential indicators of plant N nutrition in legumes and pioneer species in a rain forest of French Guiana. *Oecologia*, 1999, **120**: 171~182
- 24 Ewel J. Species and rotation frequency influence soil nitrogen in simplified tropical plant communities. *Ecol Appl*, 2006, **16**: 490~502
- 25 Warren MW, Zou X. Soil macrofauna and litter nutrients in three tropical tree plantations on a disturbed site in Puerto Rico. *For Ecol Manage*, 2002, **170**: 161~171
- 26 Hobbie SE, Reich PB, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytkowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, **87**: 2288~2297
- 27 Russell AE, Raich JW, Valverde-Barrantes OJ, Fisher RF. Tree species effects on soil properties in experimental plantations in tropical moist forest. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, **71**: 1389~1397
- 28 Corns IGW. Compaction by forest equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. *Can J For Res*, 1988, **18**: 75~84
- 29 Liu ZY (刘再华), Yuan DX (袁道先) He SY (何师意), Cao JH (曹建华), You SY (游省易), Dreybrodt W, Svensson U, Yoshimura K, Drysdale R. Origin and forming mechanisms of travertine at Huanglong Ravine of Sichuan. *Geochmica* (地球化学), 2003, **32** (1): 1~10
- 30 Hu H (胡泓), Liu SQ (刘世全), Chen QH (陈庆恒), Wang CQ (王昌全), Pan KW (潘开文), Pang XY (庞学勇). Changes of soil properties during artificial recovery of subalpine coniferous forests in western Sichuan. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2001, **7** (4): 308~314
- 31 Wang J (王晶), Bao WK (包维楷), Ding DR (丁德蓉). Surface runoff and connection with surface status and soil under three forests in Jiuzhaigou world nature heritage reserve. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 2005, **19** (3): 93~96