

祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能

孙昌平¹, 刘贤德^{1,2}, 雷蕾¹, 王有科¹, 张学龙²

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 对甘肃祁连山4种不同林地类型的土壤特性、凋落物持水量、林地土壤蓄水性能、土壤渗透性能等进行了研究。结果表明,林地内土壤容重和孔隙度(0—60 cm)差异较大,容重大小依次为:牧坡草地>祁连圆柏林>高山灌丛林>青海云杉林;总孔隙度大小依次为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地。林地间凋落物的最大持水量和最大持水率表现一致,趋势表现为:高山灌丛林>青海云杉林>祁连圆柏林>牧坡草地。不同林地间土壤非毛管孔隙持水量差别较大,4种林地的土壤非毛管孔隙持水量由大到小依次为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地。有效涵养量大小与土壤涵养降水量一致,4种林地变化范围为184.98~222.27 mm,大小顺序依次为:青海云杉林>牧坡草地>高山灌丛林>祁连圆柏林。

关键词: 林地类型; 土壤孔隙度; 土壤渗透性; 水源涵养; 枯落物; 祁连山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0068-05

中图分类号: S714.7

Soil Characteristics and Water Conservation of Different Forest Types in Qilian Mountains

SUN Chang-ping¹, LIU Xian-de^{1,2}, LEI Lei¹, WANG You-ke¹, ZHANG Xue-long²

(1. Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Academy of Water Resource Conservation Forestry of Qilian Mountains in Gansu, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: An investigation on soil characteristics, water-holding capacity of litter and soil, and soil permeability for four forest types was conducted in Qilian Mountains of Gansu Province. Results indicated that soil bulk density and total soil porosity (0—60 cm) for four forest types were different. By soil bulk density, the order of the forest types from high to low was meadowland> *Sabian przewalskii*> alpine bushwood> *Picea crassifolia*; and by total soil porosity from high to low, *Picea crassifolia*> alpine bushwood> *Sabian przewalskii*> meadowland. The maximum and maximum water holding capacity and maximum water holding rate of litter for the four forest types had the same trend and by them, the order from high to low was alpine bushwood> *Picea crassifolia*> *Sabian przewalskii*> meadowland. Soil water holding capacity of non-capillary porosity in different forest types varied greatly. By the soil water-holding capacity of non-capillary porosity, the order was *Picea crassifolia*> alpine bushwood> *Sabian przewalskii*> meadowland. The effective retention was the same as the precipitation retained in soil. The variation range for the four forest types was 184.98~222.27 mm and by the range, the order from high to low was *Picea crassifolia*> meadowland> alpine bushwood> *Sabian przewalskii*.

Keywords: forest type; soil porosity; soil permeability; water conservation; litter; Qilian Mountains

森林的水源涵养功能是森林生态系统的重要功能之一,不同森林类型由于其树种生物学特性与林分结构的不同,其林分的水源涵养效应存在一定的差异^[1]。森林涵养水源主要表现在调节水分变化,减少地表径

流,增加河流水量等功能上,有“绿色水库”之美誉^[2]。但是,不同森林土壤类型具有不同的涵养水源功能。

本研究以祁连山中部主要森林类型为对象,对其土壤特性和水源涵养功能进行研究,旨在为该区森林

收稿日期: 2009-10-15

修回日期: 2010-03-19

资助项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项“西北区(甘肃、宁夏及陕西)主要典型森林类型净生产力多尺度长期观测与评价研究”(200804006/rhhr-07)

作者简介: 孙昌平(1983—),男(水族),云南省曲靖市人,硕士研究生,研究方向森林可持续经营管理。E-mail: yilagscp@163.com。

通信作者: 刘贤德(1963—),男(汉族),甘肃省金塔县人,博士,研究员,从事生态环境治理研究。E-mail: liuxiande666@163.com。

的合理经营和利用提供依据。祁连山地处青藏、黄土两大高原和蒙新荒漠的交汇处,地理位置为东经 $97^{\circ}24'$ — $103^{\circ}46'$,北纬 $36^{\circ}43'$ — $39^{\circ}42'$;东起乌鞘岭,西至阿尔金山东段,总面积 $2.17\times 10^9\text{ hm}^2$,林地面积 $4.18\times 10^8\text{ hm}^{2[3]}$,海拔高度1 800~5 808 m,雪线4 200~5 000 m,4 500 m以上发育着现代冰川,是甘肃、青海、内蒙古等地区诸内陆河的发源地。该区自然条件复杂,水热条件差异较大,形成了多种具有明显垂直梯度和水平差异的植被和土壤类型。青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabian przewalskii*)是祁连山的乔木建群种或优势种,灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)等;草本植物主要有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、针茅(*Stipa*)、蒿(*Artemisia* sp.)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)等。

1 试验区概况

试验设在国家野外重点科学观测试验台站——祁连山森林生态站西水试验区排露沟流域($100^{\circ}17'\text{ E}$, $38^{\circ}24'\text{ N}$),海拔2 600~3 800 m,属高寒山地森林草原气候。气象站年均气温 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水在290.2~467.8 mm,年均蒸发量1 051.7 mm,平均相对湿度60%。

2 研究方法

2.1 标准地设置与调查

在多方踏查的基础上,选择具有代表性的青海云杉林、祁连圆柏林、高山灌丛林和牧坡草地4种主要植被类型,分别设置 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准地进行林分调查和土壤物理性质实验,同时在每个标准地内设5个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,用来收集枯落物。各样地基本情况见表1。

表1 样地基本情况

植被类型	坡度/坡向	海拔/m	地上林分状况			灌木草本植物优势种	盖度/%	平均高/m
			胸径/cm	树高/m	郁闭度			
青海云杉林	$26^{\circ}/\text{NE}$	2 700	21.2	19.2	0.5	山羽藓、苔草、珠芽蓼	90	9.5
祁连圆柏林	$30^{\circ}/\text{SW}$	2 700	16.0	8.2	0.4	金露梅、珠牙蓼、克氏针茅	55	4.5
高山灌丛林	$28^{\circ}/\text{SW}$	3 300	—	—	—	箭叶锦鸡儿、高山绣线菊等	95	0.5
牧坡草地林	$30^{\circ}/\text{SE}$	2 700	—	—	—	克氏针茅、冷蒿、扁穗冰草	50	0.1

2.2 测定方法

(1) 在各灌木林样地内设置 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的小样方5个,采用四分法取样称重,置于烘箱中在 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重后称重,计算枯落物自然持水率和有效持水率,根据含水量推算单位面积的现存量;

(2) 采用环刀法,于5—9月在标准地内按照土层深度0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm这4层取样,每个组合重复3次,测定土壤含水量、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和蓄水量、非毛管持水量等指标;

(3) 用ZTS-A型智能土壤渗速仪测定土壤入渗性能指标。在标准地内按照土层深度0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm分4层取样,每个组合重复3次,再结合电子秤上所设置的取样时间、环刀横截面积等参数即可计算出渗透率和渗透系数等入渗参数。

3 结果与分析

3.1 不同林地类型土壤容重与孔隙度特点

在土壤物理特性中,土壤容重说明土壤的松实程度及孔隙状况,反映土壤的透水性、通气性和根系生

长的阻力状况,是土壤物理性质的一个重要指标^[4]。由图1可以看出,由于不同林分类型的枯落物特性与土壤中根系分布不同等原因,导致其土壤容重存在一定差异,且各层土壤容重均随土壤深度的增加而增加。土壤容重均值的大小顺序为:牧坡草地>祁连圆柏林>高山灌丛林>青海云杉林。不同林地土壤容重变动在 $0.56\sim 0.92\text{ g/cm}^3$,都小于无林地的土壤容重 1.20 g/cm^3 (表2)。祁连圆柏土壤容重较之青海云杉林和高山灌丛林大,这与其分布生境条件差,林分结构不良,土壤表层蒸发强烈,土壤非毛管孔隙度小等特点是一致的。

土壤孔隙的组成直接影响土壤通气透水性和根系穿插的难易程度,并且对土壤中水、肥、气、热和微生物活性等发挥着不同的调节功能^[4-5]。由表2可以看出,就孔隙度而言,不同林地总孔隙度变动均值在49.08%~71.58%之间,其中表土层的最大,在44.7%~76.8%之间;土壤下层的最小,在52.30%~74.84%之间。总孔隙度均值表现为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地,这是因为云杉林的根系和土壤之间形成粗大的孔隙,地面的枯枝落叶苔藓层又能减轻雨滴的冲击,长期保持土壤的孔

隙不被堵塞。林地各土层毛管孔隙度均大于 38.38%,各土层毛管孔隙度平均值的大小顺序为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地。毛管孔隙度越大,土壤中有效水的贮存容量越大,可供树木根系利用的有效水分的比例就越大。

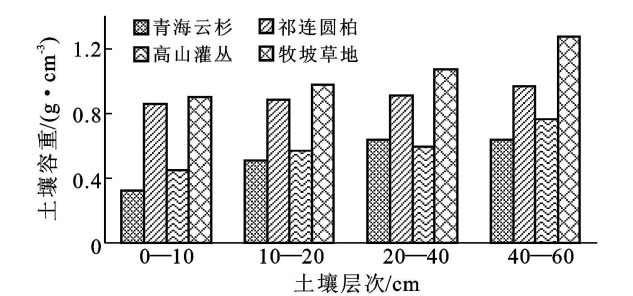


图 1 不同林地类型土壤容重随土壤深度变化

高山灌丛林与其它林型相比,高山灌丛林的土壤孔隙度稍小于青海云杉林,但远大于祁连圆柏和牧坡草地,这主要因为高山灌丛枝叶茂密,树冠紧贴地表,截持降水量能力强,蒸腾量小;且低矮的高山灌丛林又减弱了雨滴的击溅,从而避免了土壤孔隙被堵塞,

提高了土壤孔隙度的质量;加之高山灌丛林的根系也在改善着土壤的物理性状,提高了土壤的渗透率和渗透速度,减少了地表径流。

3.2 不同林地类型枯枝落叶涵养水源效益

3.2.1 不同林地类型枯落物的累积量 森林凋落物蓄积量和持水能力是反映森林水源涵养能力高低的重要因素之一。凋落物蓄积量主要取决于凋落物的输入量、分解速度和累积年限,而森林的树种组成不同、林分所处的水热条件不同,均对凋落物蓄积量有较大影响^[6]。祁连山林区林地枯落物特征如表 3 所示,枯落物现存量变动范围为 6.89~46.82 t/hm²,4 种林地类型大小依次为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地,青海云杉林和高山灌丛林的枯落物累积量分别是祁连圆柏林的 6.8 和 5.65 倍。这主要是因为祁连圆柏林的分布生境条件差(坡度大、阳坡、蒸发损失大、放牧频繁)等密切相关;另外,河西地区群众长期以来喜好祁连圆柏优良的材质用作寿木,用圆柏树叶作焚香材料等原因,致使祁连圆柏林的枯落物蓄积量相当低^[7]。

表 2 不同植被类型的土壤物理性质

植被类型	土壤层次/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
青海云杉林	0—10	0.32	76.80	38.38	38.42
	10—20	0.51	74.84	54.04	20.58
	20—40	0.64	69.92	56.66	13.26
	40—60	0.64	68.99	56.37	12.53
祁连圆柏林	0—10	0.86	63.54	50.75	12.81
	10—20	0.88	58.01	45.20	12.81
	20—40	0.91	52.30	41.70	10.30
	40—60	0.97	61.30	49.10	11.20
高山灌丛林	0—10	0.45	69.22	41.29	27.93
	10—20	0.57	57.24	45.25	16.99
	20—40	0.59	61.57	44.79	16.78
	40—60	0.76	62.03	45.81	14.13
牧坡草地	0—10	0.90	50.71	42.96	7.75
	10—20	0.98	51.40	42.35	9.05
	20—40	1.07	54.31	47.90	6.48
	40—60	1.11	55.13	48.06	7.07

3.2.2 不同林地类型枯落物的持水能力 枯落物的持水能力多用干物质的最大持水量和最大持水率来表示,其值的大小与林分类型、林龄、枯落物的组成、分解状况、累积状况等有关^[8]。从表 3 可以看出,最大持水率的顺序为:高山灌丛林(391.82%)>青海云杉林(320.46%)祁连圆柏林(166.86%)>牧坡草地。由调查可知,高山灌丛林地平均盖度为 0.66,林下分

布着较厚的苔藓和枯落物,形成一层厚达 6~18 cm 的天然蓄水层,加之高海拔降雨后产生的浅地表径流由于重力作用向下汇集,使这一灌木林分布地段土壤最大持水率大于青海云杉林^[9]。同时,枯枝落叶层对降雨的截留量与自身的蓄积量、组成结构、分解程度、湿润状况以及降水等级等有关,截留过程是一个有限的增加过程,截留率随降水等级的增加而减小^[10]。

实测资料表明, 在总降水量小于 434 mm 的情况下, 青海云杉林枯落物层共截留 78.0 mm, 占总降水量的 17.9%, 且单次降雨截留时间有时长达 24 h^[11]。但

由于祁连山绝大多数降雨过程无法使枯枝落叶层饱和而发生蓄满产流, 所以森林枯枝落叶层具有良好的涵蓄降雨作用。

表 3 不同森林类型枯落物现存量 and 持水能力

植被类型	组成成分/ %			厚度/ cm	现存量/ (t·hm ⁻²)	最大持水率/ %	最大持水量/ (t·hm ⁻²)
	叶	枝	果				
青海云杉林	67.57	17.61	14.82	2.9	46.82	320.46	150.03
祁连圆柏林	82.60	10.36	7.04	0.2	6.89	166.86	11.50
高山灌丛林	92.45	7.55		2.2	38.96	391.82	152.65
牧坡草地							

3.3 不同林地类型土壤的水源涵养能力

林地土壤是森林涵养水源的主体, 林地具有大量腐根所形成的孔隙、动物孔穴和其它非毛管孔隙; 同时具有较多的有机质和水稳性团聚体。因此, 地表凋落物层截持的降水可沿着土壤孔隙下渗, 贮存于土壤孔隙中或转变为地下径流。林地土壤对降雨的调节能力主要表现在对降雨的动态调蓄能力(即渗透能力)和静态调蓄能力两方面, 这两方面功能的强弱直接影响降水经过森林群落再分配后的时空分布状况, 尤其对地表径流、土壤潜流以及地下水的补给有着重要影响^[12]。

3.3.1 土壤渗透性能 土壤的渗透性能是土壤的重要水分物理性质之一, 也是林分水源涵养功能的重要指标, 是将地表径流转化为壤中流、地下径流的能力, 对土壤水土保持及水源涵养功能影响极大^[13]。它与土壤质地、结构、孔隙度、有机质、土壤湿度和温度有关, 渗透速率越大, 表示降水后大部分降水很快通过非毛管孔隙转入地下水, 不易形成地表径流, 使林地水土流失得到有效控制, 土壤理水调洪功能越强。

由祁连山 4 种植被类型土壤渗透实验可知(表 4), 青海云杉林的土壤稳渗速率均随土壤深度的增加而减小, 祁连圆柏林、高山灌丛林及牧坡草地的土壤稳渗速率随土壤深度的增加先增加而减小。平均土壤稳渗速率由大到小的顺序为: 青海云杉林(54.13 mm/min) > 牧坡草地(1.13 mm/min) > 高山灌丛林(1.06 mm/min) > 祁连圆柏林(0.78 mm/min); 平均土壤初渗速率变动范围为: 1.90~ 82.93 mm/min, 依次为: 青海云杉林> 高山灌丛林> 祁连圆柏林> 牧坡草地。这主要是因为 4 种植被之间土壤非毛管孔隙度不同所致。另外, 青海云杉林土壤的渗透率比其它土壤表层的渗透率要大几百倍, 渗流速度要大 1 000 多倍, 且牧坡草地表层稳渗率只为云杉林的 0.43%, 底土也只有 30%。这主要是因为青海云杉林的根系和土壤之间形成粗大的孔隙, 地面的枯枝落叶苔藓层又能减轻雨滴的冲击, 长期保持土壤的孔隙不被堵塞。

正是森林土壤这种良好的特性, 使其涵蓄着大量大气降水。经测算青海云杉林地土壤层平均含水量高达 324.8 mm, 它可以在枯水季节补给河川径流^[14]。

表 4 不同林分的土壤渗透性能

植被类型	土壤层次/ cm	渗透率/(mm·min ⁻¹)		渗流速度/ (mm·min ⁻¹)
		初渗值	稳渗值	
青海云杉	0—10	214.4	162.0	1 413.0
	10—20	80.5	33.9	29.6
	20—40	25.7	15.3	22.6
	40—60	11.1	5.3	15.8
祁连圆柏	0—10	3.2	0.6	2.7
	10—20	1.9	1.0	2.4
	20—40	1.5	0.8	3.1
	40—60	1.1	0.7	1.1
高山灌丛	0—10	3.6	0.8	3.6
	10—20	3.1	1.4	12.8
	20—40	3.1	1.0	1.6
	40—60	1.4	1.0	1.6
牧坡草地	0—10	1.4	0.7	0.9
	10—20	2.3	1.2	1.0
	20—40	1.7	0.8	1.9
	40—60	2.2	1.8	1.1

3.3.2 土壤的持水性能 土壤非毛管持水量被许多学者作为评价林地土壤水源涵养能力的重要指标, 不同的植被类型土壤非毛管的孔隙度不同, 林地的蓄水能力也不一样^[15]。

土壤非毛管持水量作为评价林地土壤水源涵养能力的重要指标, 不同林地之间的差别较大。由表 5 可以看出, 4 种林地的土壤非毛管持水量由大到小依次为: 青海云杉林> 高山灌丛林> 祁连圆柏林> 牧坡草地。且除祁连圆柏林外, 其余林分各层非毛管持水量均随土壤深度的增加而不断减小; 从持水能力的空间变化看, 随着土壤深度的增加, 各森林土壤饱和持水量出现减小趋势。

表 5 不同林分土壤持水和蓄水特征值

植被类型	土壤层次/ cm	非毛管持 水量/%	土壤饱和 持水量/%	毛管蓄水 量/mm	饱和蓄水 量/mm	涵蓄降水 量/mm
青海云杉林	0—10	38. 42	300.32	30. 29	76. 80	52. 02
	10—20	20. 58	150. 11	47. 41	74. 84	35. 68
	20—40	13. 26	111. 72	102. 66	139. 84	62. 32
	40—60	12. 53	110. 19	105. 5	137. 98	72. 25
祁连圆柏林	0—10	12. 81	73. 90	43. 65	63. 55	38. 73
	10—20	12. 81	65. 91	39. 78	58. 00	39. 02
	20—40	10. 30	57. 47	75. 9	104. 60	59. 60
	40—60	11. 20	69. 66	86. 42	122. 60	63. 08
高山灌丛林	0—10	27. 93	217. 20	41. 29	69. 22	35. 39
	10—20	16. 99	125. 80	44. 79	61. 57	26. 25
	20—40	14. 13	109. 00	91. 62	123. 76	62. 57
	40—60	11. 99	83. 56	70. 5	94. 48	60. 77
牧坡草地	0—10	7. 75	57. 73	42. 35	51. 40	35. 74
	10—20	9. 05	46. 86	42. 96	50. 71	34. 08
	20—40	6. 48	50. 87	95. 66	108. 62	73. 76
	40—60	7. 07	56. 58	96. 12	110. 26	60. 31

土壤蓄水性能与土壤前期含水量密切相关,当土壤湿度大时,土壤蓄水量减少,即使降雨量很小,也会产生地表径流。因此,把饱和蓄水量与土壤前期含水量之差作为衡量土壤涵蓄降水量的指标^[16]。祁连山西水排露沟流域土壤饱和蓄水量以毛管蓄水量为主,故毛管蓄水量与土壤前期含水量之差更能反映土壤的蓄水特性,称其为有效涵蓄量,大小与土壤涵蓄降水量一致,4种林地变化范围为184.98~222.27mm,大小依次为:青海云杉林>牧坡草地>高山灌丛林>祁连圆柏林。调查发现,祁连圆柏分布在阳坡和半阳坡,微生物活动旺盛,凋落物分解快,积累相对较少,并且分布区放牧频繁,枯落物破坏严重,蓄积量低,持水性较差。而青海云杉林分布在阴坡和半阴坡,凋落物积累多,再加上苔藓层厚,枯落物补给量足,持水能力高。

4 结 论

(1) 不同林地类型的土壤容重和土壤孔隙度差异明显,且土壤容重均随土壤深度的增加而增加,土壤总孔隙度与毛管孔隙度均随土壤深度的增加而减小。土壤容重均值的大小顺序为:牧坡草地>祁连圆柏林>高山灌丛林>青海云杉林。就孔隙度来看,不同林地总孔隙度变动在49.08%~71.58%之间,其中表土层的最大,均在61.3%以上;土壤下层的最小,在52.30%~74.84%之间。总孔隙度均值表现为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地。林地各土层毛管孔隙度均大于38.38%,各土层

毛管孔隙度平均值的大小顺序为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地。

(2) 不同林地类型枯落物最大持水率由大到少依次为:高山灌丛林>青海云杉林>祁连圆柏林>牧坡草地。高山灌丛林、青海云杉林的枯落物最大持水率分别为391.82%和320.46%,祁连圆柏林为166.86%。最大持水量亦表现为相同的性质。最大持水量反映了林地持水能力,由此可知,高山灌丛林林地枯落物持水能力优于青海云杉林、祁连圆柏林和牧坡草地。

(3) 土壤非毛管持水量作为评价林地土壤水源涵养能力的重要指标,不同林地之间的差别较大。4林分的土壤非毛管持水量由大到小依次为:青海云杉林>高山灌丛林>祁连圆柏林>牧坡草地。且除祁连圆柏林外,其余林分各层非毛管持水量均随土壤深度的增加而不断减小。

土壤蓄水性能与土壤前期含水量密切相关,当土壤湿度大时,土壤蓄水量减少,即使降雨量很小,也会产生地表径流。有效涵蓄量大小与土壤涵蓄降水量一致,4种林地变化范围为184.98~222.27mm,大小依次为:青海云杉林>牧坡草地>高山灌丛林>祁连圆柏林。

[参 考 文 献]

[1] 姜志林. 森林生态系统蓄水保土的功能[J]. 生态学报, 1984(6): 58-63.
[2] 刘明. 凤凰山林场小流域试验场森林土壤涵养水源效益研究[J]. 林业资源管理, 1998(6): 51-54.

月季和大叶黄杨在水分胁迫下各荧光参数和光合作用参数变化取得了较为一致的结论。即水分胁迫对月季和大叶黄杨的光合生理产生较大影响,但二者变化幅度有所差异,大叶黄杨对土壤水分胁迫更为敏感。

[参 考 文 献]

- [1] 李志军, 罗青红, 伍维模, 等. 干旱胁迫对胡杨和灰叶胡杨光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1): 45-52.
- [2] 王颖, 魏国印, 张志强, 等. 7种园林树种光合参数及水分利用效率的研究[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(6): 44-48.
- [3] 朱教君, 康宏樟, 李智辉, 等. 水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗存活与光合特性影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2527-2533.
- [4] 柯世省. 干旱胁迫对夏蜡梅光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(6): 1209-1215.
- [5] 柯世省, 杨敏文. 水分胁迫对云锦杜鹃光合生理和光温响应的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(4): 959-964.
- [6] 王强, 陈存根, 钱红格, 等. 水分胁迫对6种苗木光合生理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 144-149.
- [7] 张丽萍, 张志平, 傅松玲, 等. 蝴蝶兰、月季新品种生理特性的初步研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(4): 523-528.
- [8] 王勇, 杨培岭, 任树梅, 等. 两种抗旱剂对大叶黄杨光合特性的耦合效应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 514-518.
- [9] 冯强, 胡聃, 李娜, 等. 典型城区与郊区环境大叶黄杨气体交换及叶绿素荧光特性比较[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3477-3484.
- [10] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- [11] 喻方圆, 徐锡增. 植物逆境生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 6-11.
- [12] 黄华宏, 陈奋童, 童再康, 等. 矮生杉木光合特性及叶绿素荧光参数研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(2): 69-73.
- [13] Monneveux P, Rekika D, Acevedo E, et al. Effect of drought on leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, transpiration efficiency and productivity in field grown durum wheat genotypes[J]. Plant Science, 2006, 170: 867-872.
- [14] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [15] 胡学华, 蒲光兰, 肖千文, 等. 水分胁迫下李树叶叶绿素荧光动力学特性研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 75-77.
- (上接第72页)
- [3] 中国科学院兰州沙漠研究所河西考察队. 甘肃省河西地区水土资源的合理开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 2-8.
- [4] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 江西大岗山3种林型土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 151-153.
- [5] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水文物理性质特征分析[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 1-6.
- [6] 高人, 周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型凋落物层持水性能研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 115-118.
- [7] 刘贤德, 王清忠. 祁连圆柏[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 50-86.
- [8] 巍强, 张秋良, 代海燕, 等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [9] 牛赞, 敬文茂. 祁连山北坡主要植被下土壤异质性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 258-261.
- [10] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土流失学报, 1998, 4(2): 23-28.
- [11] 金博文, 康尔四, 宋克超, 等. 黑河流域山区植被生态水文功能的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 580-584.
- [12] 郑郁善, 陈礼光, 洪长福, 等. 沿海丘陵巨尾桉人工林水源涵养功能研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(2): 220-224.
- [13] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(6): 1-5.
- [14] 金博文, 康尔四, 宋克超, 等. 黑河流域山区植被生态水文功能的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 580-584.
- [15] 王棣, 吕皎. 油松混交林的水土保持及水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 44-46.
- [16] 周择福. 北京九龙山低山区不同立地土壤水分生态及综合评价的研究[J]. 北京水利, 1996(4): 28-31.