

黄土地区防护林生态系统水量平衡研究^{*}

余新晓

陈丽华

(北京林业大学, 北京, 100083)

5727.2

5718.55

A

摘要 根据黄土地区防护林生态系统水分循环的特征, 提出了防护林生态系统水量平衡方程, 通过对1988~1992年刺槐、油松、沙棘、虎榛子林地、草地和裸地6种生态系统水量平衡的分析, 结果表明降雨是防护林生态系统主要的水分输入量, 刺槐和油松林根际层以下土壤水分的上升补给, 也是重要的水分输入项, 特别是春季的4~6月份, 更是防护林生态系统极为重要的水分来源, 刺槐林和油松林平均根际区下层土壤水分上升补给量占降雨量的6.32%~11.55%。蒸散发和林冠截留是防护林生态系统主要水分输出项, 在比较干旱季节或月份, 蒸降比出现大于1.0情况, 大气降雨不能满足林木生理蒸腾和土壤蒸发的要求, 地表径流量一般比较小, 主要发生在7、8、9三个月, 地表径流量仅占同期降雨量的1.51%~3.87%。根际区土壤存在着一个比较稳定的含水量范围, 其值为8.1%~9.8%, 相应于根际区内有效土壤水分贮量为120~200 mm, 据此确定出在研究地区正常年份, 目前防护林经营状况条件下, 土壤水分只可供刺槐林正常生长10~16 a, 油松林正常生长5~8 a。经水量平衡强度系数计算, 得到刺槐林和油松林水量平衡强度系数平均为48.20%~50.19%, 属于分类的差级, 沙棘和虎榛子林40.43%~40.74%, 属分类的中级, 表明在现有经营管理条件下乔木林地水分供应不足, 灌木林地水分供应基本可满足要求, 通过水量保证系数计算, 刺槐林和油松林水量平衡保证系数为-1.52%~-3.47%, 灌木林地则均为正值, 沙棘林和虎榛子林为1.24%~1.71%, 表明在现有经营管理条件下乔木林地水分无法保证供应, 但水分条件对灌木生长是有保证的。

关键词: 水量平衡, 防护林生态系统, 黄土地区,

森林生态学;

A STUDY ON WATER BALANCE OF PROTECTIVE FOREST ECOSYSTEM IN LOESS AREA

Yu Xinxiao Chen Lihua

(Beijing Forestry University, Beijing, China, 100083)

Abstract According to the features of water cycle in protective forest ecosystem in loess area, the equation of water balance for the protective forestry ecosystem was put forward. The tables of water balance were presented for 6 ecosystems in the period from 1988 to 1992. From the experimental results of water balance, the input and output of the protective forest ecosystem were analyzed. It is pointed out that rainfall and exchange of water between root zone and deep soil were main water input, evapotranspiration and canopy interception were main water outputs, while soil surface runoff was a very little water output. The study proves that there was a relative stable soil water content in profile of the soil, which can provide water for trees

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994 05 26。

in some years. By the analysis of coefficient of water balance intensity and coefficient of water balance guarantee, it was pointed out that soil water was sufficient for scrubs, but insufficient for trees.

Key words: water balance, protective forest ecosystem, loess area.

水分循环与水量平衡是生态系统最重要的功能和特征之一。作为我国生态林业工程之首的“三北”防护林体系建设工程,特别是在干旱半干旱黄土地区的防护林体系是一个巨大的防护性森林生态系统,对其水量平衡的研究,对于正确认识和确切评价防护林体系的环境生态作用,对黄土高原防护林体系建设工程和林业发展都具有重要的理论和实践意义。

1 试验地点与研究方法

1.1 试验地点

试验地在山西省吉县北京林业大学科研试验场内。试验地区地理坐标为东经 $110^{\circ}45'$ ~ $111^{\circ}07'$, 北纬 $36^{\circ}00'$ ~ $36^{\circ}05'$, 海拔高程为 947 ~ 1332 m, 属于黄土残原沟壑区。研究区内平均降水量为 579 mm, 年平均蒸发量为 1724 mm, 年平均气温 10.0°C , 平均相对湿度 62%, 无霜期 172 d, 属暖温带半干旱大陆性气候。研究区内土壤为褐土, 土质均一, 质地疏松, 水土流失十分严重, 土壤侵蚀模数达到 $7000 \sim 10000 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。

1.2 试验样地概况

本项研究的各项试验观测均在所选择的 6 个样地(水量平衡场)中进行的, 各样地基本情况见表 1。

表 1 试验样地(水量平衡场)基本情况

Table 1 The situation of experimental plots (water balance plots)

地类 Plot	坡向 Slope direction	坡度 Slope gradient	坡位 Slope position	树龄 Stand age	林分密度 (株/ km^2) Stand density	平均树高 (m) Tree height	平均胸径 (cm) DBH	林冠郁闭度 (%) Cover degree	冠层平均厚度 (m) Crown thickness
刺槐林地 Black locust	N 205	22.0	中	14	2100	11.5	6.7	76	3.1
油松林地 Chinese pine	N 50	27.0	中	12	5000	6.8	4.8	88	3.5
沙棘林地 Seabuckthorn	N 40	24.5	中	8	9200	1.2	—	85	1.0
虎榛子林地 David ostryopsis	N 335	28.0	中	7	8800	1.4	—	90	1.2
草地 Grass	N 315	27.0	中	—	—	0.3	—	60	—
裸地 Bear	N 315	27.0	中	—	—	—	—	—	—

1.3 研究方法

采用设置水量平衡场, 定位观测的方法进行研究。研究时间为 1988 年初 ~ 1992 年底。

1.3.1 降雨量 采用长期自记雨量计和日记式雨量计, 记录降雨量和降雨过程。

1.3.2 林冠截留量 采用 20 \times 500 cm 槽型承雨器与自记量水计相连接, 记录林下降雨量

和降雨过程,使用余项法确定林冠截留量。

1.3.3 地表径流量 采用垂直投影面积为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的坡面径流试验场,并配置自记量水计记录地表径流量和地表径流过程。

1.3.4 土壤水分动态 采用土钻称重法和中子水分仪法并行观测土壤含水量,观测深度为 2 m ,测层厚度为 20 cm ,每 $5\sim 7\text{ d}$ 测定一次。布设张力计监测土壤水势的动态变化情况。

1.3.5 蒸发散量 根据实测资料采用土壤水分通量方法确定^[1-3]。

1.3.6 土壤水分交换量 根据实测资料采用非饱和土壤水分运动的 Darcy 定理确定^[4]。

2 防护林生态系统水分循环过程与水量平衡方程

降雨、植被冠层截留、入渗、土壤水分再分布,植物根系吸水、水在植物体内传输、通过气孔扩散到叶片周围空气层,最后参与大气湍流交换等一系列的防护林生态系统的水量转化过程在连续不断的进行着^[5-12],形成了防护林生态系统水分循环过程。水分循环过程从长期的自然过程来看,它们又是处于连续不断的相对动态平衡状态。研究水量收支、贮存与转化的基本方法是水量平衡法。

根据质量守恒定律,在某一时期 Δt 内水量收支差值等于其内部贮水量的变化,因此,对防护林生态系统可写出如下水量平衡方程:

$$(P + Pc + Pl + Sd) - (E + T + Fd + Ic + Il + Rs + Rss) = \Delta W_s + \Delta W_p \quad (1)$$

式中: P 是大气垂直降雨量; Pc 是森林植被冠层水平降水量; Pl 是枯枝落叶层水平降水量; Sd 是地下深层补给量; E 是森林植被叶片蒸腾量; T 是土壤蒸发量; Fd 是深层渗透量; Ic 是森林植被冠层截留量; Il 是枯枝落叶层截留量; Rs 是地表径流量; Rss 是壤中流量; ΔW_s 是根际区土壤贮水变化量; ΔW_p 是森林植被物体体内贮水变化量。

(1)式是某一时期 Δt 内的平均情况,防护林生态系统水量平衡方程还可用下述动态方程来表示:

$$\int_{t_1}^{t_2} [(P + Pc + Pl + Sd) - (E + T + Fd + Ic + Il + Rs + Rss)] dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_u^{z_r} \frac{\partial W_s}{\partial t} dz dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial W_p}{\partial t} dt \quad (2)$$

在水量平均方程中,各水分分量所起的作用是不同的,根据对各水分分量的讨论分析^[13],在忽略水量平均方程中其影响作用很小的分量后,可近似写出如下防护林生态系统水量平衡方程:

$$\Delta W_s = P - Ic - E - T - Rs \pm SF \quad (3)$$

或:

$$\frac{\partial W_s}{\partial t} = P(t) - Ic(t) - E(t) - T(t) - Rs(t) \pm SF(t) \quad (4)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_u^{z_r} \frac{\partial W_s}{\partial t} dz dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_u^{z_r} [P - Ic - E - T - Rs \pm SF] dt dz \quad (5)$$

3 防护林生态系统水量平衡分析

根据实测资料和防护林生态系统水量平衡方程,得到不同防护生态系统水量平衡结果见表 2~3 和图 1。

表 2 防护林生态系统水量平衡统计表 (mm)

Table 2 Summary of water balance for protective forest ecosystem

年份 Year	地类 Plot	P	I_c	ET	R_s	SF	ΔW_s	Δ
1988	刺槐林地 Black locust		73.1	365.6	8.16	-57.8	-43.3	-7.4
	油松林地 Chinese pine		81.6	384.6	6.17	-70.3	-54.7	-9.0
	沙棘林地 Seabuckthorn	338.4	68.7	281.1	4.16	-1.8	-14.2	-3.2
	虎榛子林地 David ostryopsis		61.8	287.8	4.30	-3.1	-6.7	-5.7
	草地 Grass		15.2	216.3	11.80	43.5	62.7	-11.1
	裸地 Bear			176.2	11.85	88.7	67.0	-5.4
1989	刺槐林地 Black locust		56.1	314.3	9.19	1.9	2.4	-6.4
	油松林地 Chinese pine		93.6	323.8	6.07	-27.2	-11.1	-7.7
	沙棘林地 Seabuckthorn	377.5	72.0	303.9	7.54	-5.7	7.9	-8.1
	虎榛子林地 David ostryopsis		78.7	307.5	7.00	-2.2	-6.6	-6.9
	草地 Grass		18.7	256.0	11.54	47.5	55.3	-11.5
	裸地 Bear			215.3	14.62	83.9	73.5	-9.8
1990	刺槐林地 Black locust		87.6	353.6	9.58	-2.8	0.8	-7.1
	油松林地 Chinese pine		108.4	402.9	7.43	-44.0	-26.0	-7.0
	沙棘林地 Seabuckthorn	441.7	90.6	317.4	8.57	-5.2	25.1	5.2
	虎榛子林地 David ostryopsis		84.6	309.7	7.41	20.0	27.3	-7.3
	草地 Grass		17.8	258.7	13.09	79.8	75.7	-3.4
	裸地 Bear			220.6	18.80	113.8	94.1	-5.6
1991	刺槐林地 Black locust		73.1	354.9	8.56	-30.6	-15.9	-4.6
	油松林地 Chinese pine		96.6	367.8	5.95	-55.9	-23.3	-5.6
	沙棘林地 Seabuckthorn	385.6	77.9	269.9	4.94	-2.9	31.6	4.2
	虎榛子林地 David ostryopsis		67.4	297.8	4.89	7.8	12.2	-4.5
	草地 Grass		17.5	249.4	11.86	63.4	49.2	-5.8
	裸地 Bear			183.2	15.28	102.8	88.0	-3.7
1992	刺槐林地 Black locust		76.1	361.5	9.86	-33.3	-11.3	-6.9
	油松林地 Chinese pine		91.4	350.0	6.88	-26.5	-19.4	-6.4
	沙棘林地 Seabuckthorn	296.0	74.4	289.6	6.16	-2.7	20.9	7.6
	虎榛子林地 David ostryopsis		76.9	272.3	5.79	20.1	26.4	-5.5
	草地 Grass		15.7	198.1	12.02	80.2	93.2	-3.2
	裸地 Bear			164.2	14.58	108.8	109.0	-0.6

注: Δ 是根际水量平均观测值的计算修正值。

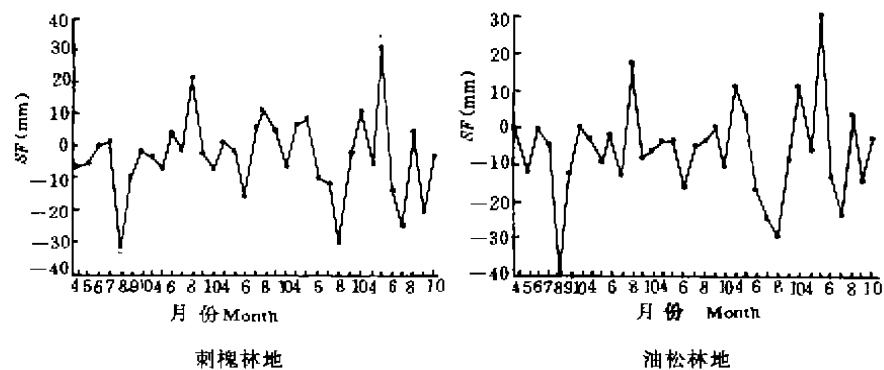


图 1 水量平衡各分量随时间的变化过程

Fig. 1 Process of water balance

表 3 防护林生态系统水量平衡各分量分配比例表 (%)
Table 3 Distribution of water balance for protective forest ecosystem

地 类 Plot	P	I_c	ET	R_s	SF	ΔW_s	Δ
刺槐林地 Black locust	100.00	18.87	90.24	2.34	-6.32	-3.47	-1.65
油松林地 Chinese pine	100.00	21.32	94.32	1.68	-11.55	-6.94	-1.84
虎榛子林地 Seabuckthorn	100.00	19.80	75.39	1.62	-0.76	3.68	0.30
沙棘林地 David ostryopsis	100.00	19.05	76.07	1.52	2.20	2.71	-1.54
草地 Grass	100.00	4.38	60.77	3.11	16.21	17.33	-1.81
裸地 Bear	100.00	-	49.48	3.87	25.68	22.26	-1.07

从以上表中结果可见,降雨是防护林生态系统最重要的水分输入量,防护林生态系统水分循环和水量平衡方程中其它水分分量的变化均取决于降雨量的多寡。蒸发散和林冠截留量是防护林生态系统的水分输出项,其中蒸发散是主要水分输出项,在比较干旱的季节或月份,蒸发散量可超过同期的降水量,如以蒸降比(蒸发散量与降雨量的比值)来衡量,这些时段均大于 1,也就是说在干旱季节,大气降雨不能满足林木生理蒸腾和土壤蒸发的要求,须消耗土壤水分来补偿^[14,15]。根据 5 a 的实验观测,发现在晋西黄土地区地表径流量较小,一般只在 7,8,9 三个月发生产流,总的地表径流量占同期降雨量的 1.51% ~ 3.87%,可见地表径流量是防护林生态系统比较不重要的水分输出项。

下面着重分析根际区土壤层间水分交换量和深层水分交换量。从表 2、3 中可以看出各种乔木植被条件的根际区深层水分交换量多为负值,根据作者的定义可知这是一种深层水分的上升补给。这是根际区土壤水分的一种重要补给来源,实质上也是防护林生态系统的一种重要水分输入项。多年平均刺槐林地根际区下层土壤水分上升补给量占降雨量的 6.32%、油松林地 11.55%。

根际区土壤水分交换量表明了整个根际区内水分运动的总趋势。根际区交换量随时间的变化情况如图 2。图中峰区是干燥时期,谷区是湿润时期,也即峰区是土壤水分上升补给时期,谷区则是深层补给渗漏区。由图中可见,交换量在 1 a 中可分成 3 种情况,3、4、10、11 月,交换量变化较小,也就是说根际区水分交换量处在小而稳定的状态,5、6 月份和 10 月份,交换量为负值,即根际区水分上升运动占主导地位,7、8、9 月份,交换量转化为正值,即根际区水分运动出现了下渗运动。

从图中可见,各种防护林生态系统土壤初春即有深层水分上升补给根际区,随着林木生长发育,需水量逐渐增加,根际区上层水分减少,深层水分上升补给,5、6 月上升率达到最大,日平均上升补给量可稳定在乔木和灌木林地 0.2~0.8 mm,草地和裸地则基本上无上升补给,7~9 月份由于大量降雨补给土壤,特别是其上层,深层上升补给量逐渐降低,甚至转换为深层渗漏,使渗入土壤中的水分储存起来,也就是说深层水分交换方向发生了变化。而在 3、4 月份和 10、11 月份,由于森林植物生理活动微弱,需水量很少,所以深层上升水分补给量很小。可见乔木林在黄土区耗水量非常大,深层水分上升补给是乔木林生态系统根际区水分的重要来源之一。

4 讨论

在 5 a 的实验研究期间,由 Penman(FAO, 1979)^[16]方法计算得到的年蒸散势平均值为 890 mm,由土壤动力水文学方法得到的实际蒸散量为刺槐林 366.0 mm,油松林 381.9

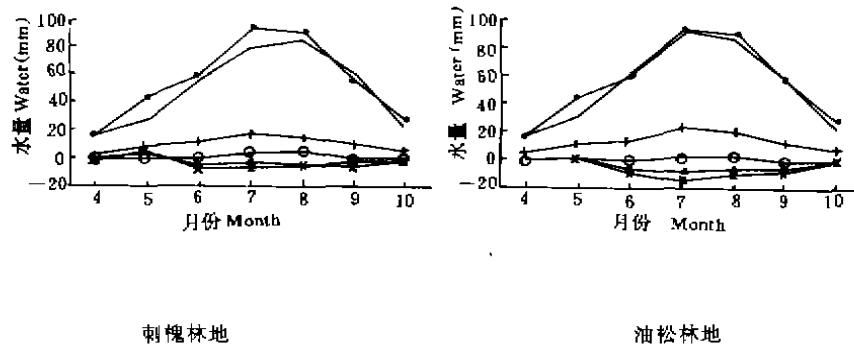


图 2 根际区土壤水分交换量的变化
Fig. 2 Soil water exchange in root zone

mm, 沙棘林 306.6 mm, 虎榛子林 309.3 mm, 草地 249.1 mm, 裸地 203.4 mm。由此可得相对蒸散率为刺槐林 0.41, 油松林 0.43, 沙棘林 0.34, 虎榛子林 0.35, 草地 0.28, 荒地 0.23。由实测降雨资料可知, 生长季(4~10月)平均降水量为 387.8 mm, 由此似乎在正常年份不存在水分缺乏问题, 但在防护林生态系统中除蒸散外, 还有林冠截留和地表径流等水分输出项, 所以实质上两种乔木林均存在着水分亏缺, 其中刺槐林地水分平均年亏缺 12.3 mm, 油松林地亏缺 26.9 mm。

通过对实测土壤含水量的分析, 发现根际区土壤存在着一个比较稳定的含水量范围, 其值为 8.16%~9.8%, 可以认为这一稳定的含水量是防护林生态系统水分收支平衡情况下土壤所能长期保持的最大含水量, 如果每年水分收支平衡, 则土壤大体维持这一含水量, 若收不抵支, 则土壤水分必将低于稳定含水量。在根际区内, 从稳定含水量到凋萎含水量(4.5%~5.1%)的有效土壤贮水量为 120~200 mm。

根据以上分析可知, 在正常年份, 稳定含水量条件下的土壤水分可供刺槐林正常生长 10~16 a ($120/12.3=9.8$)~16 ($200/12.3=16.3$), 油松林 5~8 a ($120/26.9=4.5$)~8 ($200/26.9=7.5$), 即乔木林生长的土壤在 5~16 a 后根际区土壤水分将逐渐降低, 严重影响森林植被的生长。这一结果与研究地区林木多年的实际生长状况是一致的^[23]。

为了探索防护林生态系统水分保证指标, $\Phi. C.$ 切尔尼可夫提出用防护林生长期内的耗水量作为林木水分需求保证性指标, A. X. 波尔强科进一步提出水量平衡强度系数公式^[18]:

$$K_a = \frac{A}{E_a} \cdot 100 \quad (6)$$

式中: K_a ——水量平衡强度系数(%); A ——生长期内土壤水分的消耗量或林分蒸散量(mm); E_a ——年潜在蒸发量(mm)。根据上式可将水量平衡强度系数分成 5 级, 即:

优 0—20; 良 21—35; 中 36—45; 差 46—55; 临界 56—65。

表 4 水量平衡强度系数值表(%)

Table 4 Intensity coefficient of water balance

年份 Year	刺槐 Black locust	油松 Chinese pine	沙棘 Seabu- ckthorn	虎榛子 David ostroyopsis
1988	47.68	50.11	37.15	37.83
1989	46.24	47.62	44.97	45.13
1990	45.62	51.95	40.83	40.17
1991	49.43	51.20	37.81	41.67
1992	52.03	50.08	41.41	38.96
平均	48.20	50.19	40.43	40.74
Average				

类中级,表明水分供应基本可以满足要求。

另外,利用水量平衡保证系数也可衡量林分的水分供应状况,其计算公式如下:

$$Kb = \frac{B}{E_0} \times 100 \quad (7)$$

式中: Kb ——水量平衡保证系数(%); B ——生长期土壤有效水分储备量(mm); E_0 ——同前。

实验资料的计算结果列于表 5,结果表明乔木林水量平衡保证系数很低,甚至为负数,其中油松最低;说明在晋西黄土地区现有森林经营条件下,水分无法保证供应;而灌木林较高,并均为正值,表明晋西黄土区的水分条件对灌木林的生长是有保证的。

在黄土地区,各种森林植被都具有庞大的根系和很强的吸水能力,它们甚至可以利用接近凋萎含水量的土壤水分,这就决定了它们有较强的适应性和抗旱能力,但同时必须指出,森林植被消耗深层水分势必造成深层水分亏缺,在经营管理下不合理的林地这种水分亏缺很难恢复,造成土壤干旱化和林木生产力越来越低,这是黄土高原防护林体系建设和林业发展中亟待解决的一个重大问题。

表 5 水量平衡保证系数值(%)

Table 5 Guarantee coefficient of water balance

年份 Year	刺槐 Black locust	油松 Chinese pine	沙棘 Seabu- ckthorn	虎榛子 David ostroyopsis
1988	-4.79	-6.83	-1.78	0.84
1989	0.34	-1.56	1.11	-0.93
1990	0.10	-3.21	2.11	3.37
1991	-2.12	-3.11	2.88	1.63
1992	-1.47	-2.66	1.90	3.62
平均	-1.52	-3.47	1.24	1.71
Average				

参 考 文 献

- 1 雷志栋, 杨诗秀等. 田间土壤水量平衡与定位通量法的应用. 水利学报, 1988, (5): 8~16
- 2 余新晓. 运用土壤定位通量法确定森林生态系统蒸散量. 中日技术合作中国黄土高原治山技术培训项目合作研究论文集. 北京: 中国林业出版社, 1994. 43~47
- 3 Cooper J D. Measurement of moisture fluxes in unsaturated soil in the ford forest. Inst. of Hydrology Wallingford. Report 1980, (6): 12~38
- 4 Yu Xinxiao. A study on water exchange in root zone of protective forest ecosystem in loess area. Journal of Beijing

- Forestry University*, 1994, 3(1):18~25
- 5 陈丽华, 余新晓编译. 森林水文研究. 北京: 中国林业出版社, 1988, 80~89
 - 6 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地生态水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2):91~101
 - 7 朱劲伟等. 红松林和采伐迹地的水量平衡分析. 生态学报, 1982, 2(4):335~344
 - 8 Eagleson P. S. Climate, Soil and Vegetation, 1. Introduction to water balance dynamics. water balance, *Water Resour. Res.* 1978, 14(5): 832~847
 - 9 Belmans C. Simulation model of the water balance of cropped soil. *J. Hydro*, 1983, 63:271~283
 - 10 Paul Kramer J. Water relations of plants. Academic Press, 1983, 127~148
 - 11 DVWK, Wald und wasser. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., 1988, 82~94
 - 12 Stentzer E. Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 1988, 31: 75~89
 - 13 余新晓. 黄土地区防护林体系根际区土壤水分平衡研究. 水土保持科学研究与发展(余新晓主编). 北京: 中国林业出版社, 1993, 41~49
 - 14 杨新民, 杨文治. 干旱地区人工林地土壤水分平衡的探讨. 水土保持通报, 1988(3): 34~38
 - 15 杨文治, 韩仕峰. 黄土丘陵地区人工林草地的土壤水分生态环境. 中国科学院西北水土保持研究所集刊(第2集). 西安: 陕西科学技术出版社, 1985. 32~40
 - 16 FAO, Agrometeorological crop nutrition. Rome, 1979, 177~193
 - 17 张建军, 余新晓. 晋西黄土地区主要防护林树种生长规律的研究. 水土保持科学研究与发展(余新晓主编). 北京: 中国林业出版社, 1993, 266~271
 - 18 孙洪祥. 干旱地区造林学. 北京: 中国林业出版社, 1991, 208~213