

黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田 土壤干燥化效应比较*

李 军^{1,2} 陈 兵^{1,4} 李小芳¹ 赵玉娟³ 次仁央金¹ 蒋 斌³ 胡 伟¹

(1 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(4 海南农垦科技创新中心, 海口 570206)

摘 要 黄土高原人工林草地和旱作农田土壤干燥化问题十分突出, 严重威胁着人工植被建设成效和旱作农业可持续发展。通过对黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区 53 类林地、草地和农田深层土壤湿度的观测, 分析比较了各类型区各类林地、草地和农田土壤湿度、土壤水分过耗量、土壤干燥化指数、土壤干层厚度等土壤干燥化效应指标。结果表明: (1) 林地、草地和农田土壤湿度平均值依次为 6.46% ~ 12.57%、6.49% ~ 11.52% 和 9.32% ~ 16.00%, 均以半湿润区最高, 半干旱区居中, 半干旱偏旱区最低, 林地、草地和农田土壤水分过耗量平均值分别为 521 mm、491 mm 和 30 mm, 林地土壤水分过耗量以半干旱区最高, 草地以半湿润区和半干旱偏旱区最高, 农田以半干旱偏旱区最高; (2) 林地、草地和农田土壤干燥化指数平均值依次为 39%、42% 和 96%, 分别属于严重干燥化、严重干燥化和轻度干燥化强度, 林地土壤干燥化程度以半干旱区和半干旱偏旱区最严重, 草地以半湿润区和半干旱偏旱区最严重, 农田以半干旱偏旱区最严重, 林地、草地和农田土壤干层厚度平均值依次为 881 cm、836 cm 和 336 cm, 林地土壤干层厚度以半干旱区和半干旱偏旱区最厚, 草地和农田以半干旱偏旱区最厚。

关键词 黄土高原; 林地; 草地; 农田; 土壤湿度; 土壤干燥化; 土壤干层

中图分类号 S152.7

文献标识码 A

近年来有关黄土高原林草植被建设和旱作农业试验研究表明, 随着气候干旱化趋势的日益显现以及人工林草与农田作物水分生产力的持续提高, 黄土高原自然降水、土壤贮水和作物(林草)耗水关系失衡, 导致土壤水库深层贮水量显著降低, 旱地土壤干燥化现象普遍发生, 人工林草生长衰败严重, 农田作物产量波动性加剧, 成为制约黄土高原人工植被重建和旱作农业可持续发展的重大生态隐患^[1~6]。但目前有关黄土高原林地、草地和农田土壤干燥化研究仅限于对土壤干燥化现象的揭示, 对不同降水类型区和不同土地利用方式下土壤干燥化效应的定量比较研究尚不多见, 各类土地利用方式下土壤干燥化强度和土壤干层厚度等基本特征仍不明晰^[6~16]。早在 20 世纪 20 ~ 40 年代, 美国就已发现了苜蓿对土壤湿度的显著影响, 并开展了通过作物轮作恢复草地土壤水分的研究; 20 世纪 70 年代以来, 在美国

中西部大平原, 有关学者研究了减轻农田干旱的效应, 近年来又观测了高粱和向日葵等深根高耗水作物的季节性土壤干层分布深度, 但关于各类林地、草地和农田的土壤干燥化效应的系统定量研究仍然鲜见报道^[17~19]。本研究通过对黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区各类林地、草地和农田深层土壤湿度剖面分布特征的大范围野外实地观测, 试图定量评价不同降水类型区各类林地、草地和农田土壤干燥化现状, 为黄土高原人工植被建设和旱作农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

按照黄土高原气候和自然植被地带地域分异规律^[3], 本研究选择了黄土高原南部半湿润区的长武、

*国家自然科学基金项目(40371077 和 30471024)资助

作者简介: 李 军(1964 ~), 男, 甘肃泾川人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农业生态、高效农作制度和农业生产系统模拟等领域研究与教学工作, 发表论文 60 余篇。E-mail: junli @nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2006 - 09 - 15; 收到修改稿日期: 2007 - 01 - 19

镇原、子午岭和洛川、中部半干旱区的定西、固原和安塞、北部半干旱偏旱区的海原等 8 个代表点实地观测人工林地、草地和农田土壤湿度。在南部半湿润区 4 个观测点,年均气温 $9.0 \sim 9.2$, 10 积温 $2\ 998 \sim 3\ 026$, 年降水量 $576 \sim 620$ mm, 年蒸发量 $1\ 482 \sim 1\ 638$ mm, 土壤为黑垆土, 田间持水量和凋萎湿度分别为 22 % 和 9 %。在中部半干旱区 3 个观测点, 年均气温 $6.1 \sim 8.8$, 10 积温 $2\ 239 \sim 3\ 177$, 年降水量 $425 \sim 505$ mm, 年蒸发量 $1\ 489 \sim 1\ 773$ mm, 土壤为黄绵土, 田间持水量和凋萎湿度分别为 19 % 和 5 %。在北部半干旱偏旱区海原, 年均气温 7.3 , 10 积温 $2\ 392$, 年降水量 386 mm, 年蒸发量 $2\ 157$ mm, 土壤为黄绵土, 田间持水量和凋萎湿度分别为 17 % 和 4.5 %。黑垆土和黄绵土的土壤容重均为 1.3 g cm^{-3} 。

1.2 土壤湿度测定方法

于 2004 ~ 2005 年相继在长武、镇原、子午岭、洛川、定西、固原、安塞、海原等观测点选择具有代表性的人工乔木林地、灌木林地、人工苜蓿和沙打旺草地、天然草地和旱作粮田等 53 类土地利用方式, 进行深层土壤水分测定, 具体土地利用方式和观测地点分布状况见表 1。土壤含水量测定采用土钻取样、烘干法测定, 林地和草地最大观测深度为 1 000 cm, 农田最大观测深度为 600 cm, 每 20 cm 取样一次, 在 105°C 烘干至恒重, 分别称量湿土重、干土重和铝盒重, 最后计算各层土壤质量含水量。

不同土地利用方式下土壤湿度的最大观测深度不同, 各类林地、草地和农田土壤湿度剖面平均值和土壤干层深度等指标均按照实际测深计算(见表 1), 但为了便于比较土壤干燥化程度, 在计算土壤贮水量、土壤有效贮水量(土壤贮水量与凋萎湿度时贮水量的差值)和土壤水分过耗量(土壤贮水量与土壤稳定湿度时贮水量的差值)等指标时, 所有类型林地、草地和农田均按照 1 000 cm 测深计算, 由于 600 cm 以下深层土壤湿度通常高于其上土层, 因此, 对于测深不到 1 000 cm 的观测点, 其计算结果较实际值稍低。这是因为农田作物根系主要分布于 0 ~ 300 cm 土层, 其吸水土层主要分布在 0 ~ 400 cm 范围, 400 ~ 1 000 cm 土层土壤湿度随土层深度增加呈现逐渐升高趋势, 即 600 ~ 1 000 cm 土层土壤湿度与 0 ~ 600 cm 土层相当或者稍高, 其土壤湿度剖面分布类似于林地和草地(见图 1 ~ 图 3)。因此, 农田 0 ~ 1 000 cm 土层土壤湿度平均值应该相当于或者稍高于 0 ~ 600 cm 土层土壤湿度平均值。

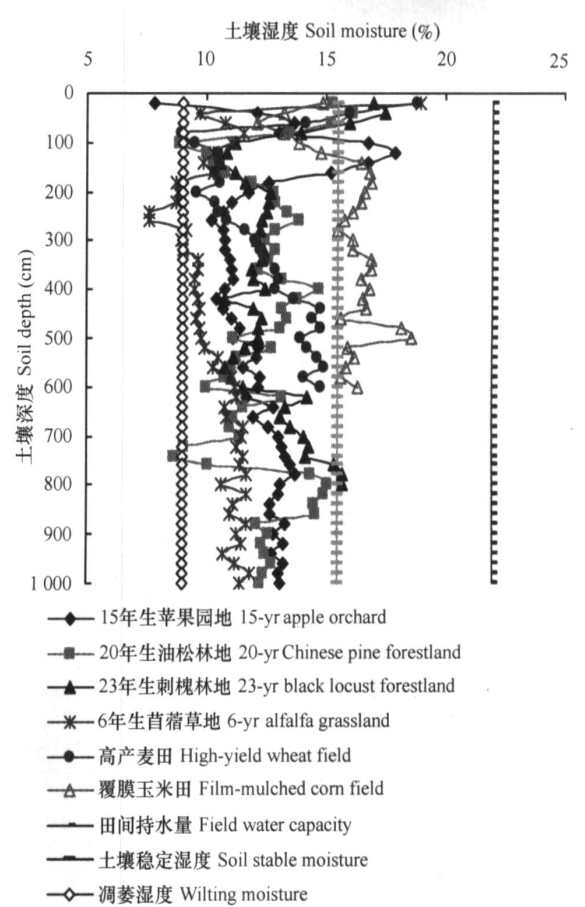


图 1 半湿润区林地、草地与农田土壤湿度剖面分布比较

Fig. 1 Soil moisture distribution in forestlands, grasslands and croplands in the semi-humid zone

1.3 土壤干燥化强度评价方法

为了定量评价和比较不同土地利用方式下土壤干燥化效应, 通常采用土壤稳定湿度值作为判断土壤干燥化现象的上限指标^[7~9,15]。若某一土层土壤湿度值低于土壤稳定湿度值, 则表明该土层发生了土壤干燥化现象。在本研究中, 土壤稳定湿度值采用土壤凋萎湿度与田间持水量的平均值计算, 取值范围介于 10 % ~ 16 % 之间, 约为田间持水量的 50 % ~ 70 %。该值反映了某一种土壤对水分保持能力的中间状态, 不随降水量的年度和季节变化而发生变化, 便于在不同降水年型、不同季节和不同降水类型区之间比较林地、草地和农田的土壤干燥化强度。在南部半湿润区、中部半干旱区和北部半干旱偏旱区, 土壤稳定湿度值分别为 15.50 %、12.00 % 和 10.75 %。

为了便于定量描述林地、草地和农田土壤干燥化强度、比较各类土地利用方式下土壤干层的剖面

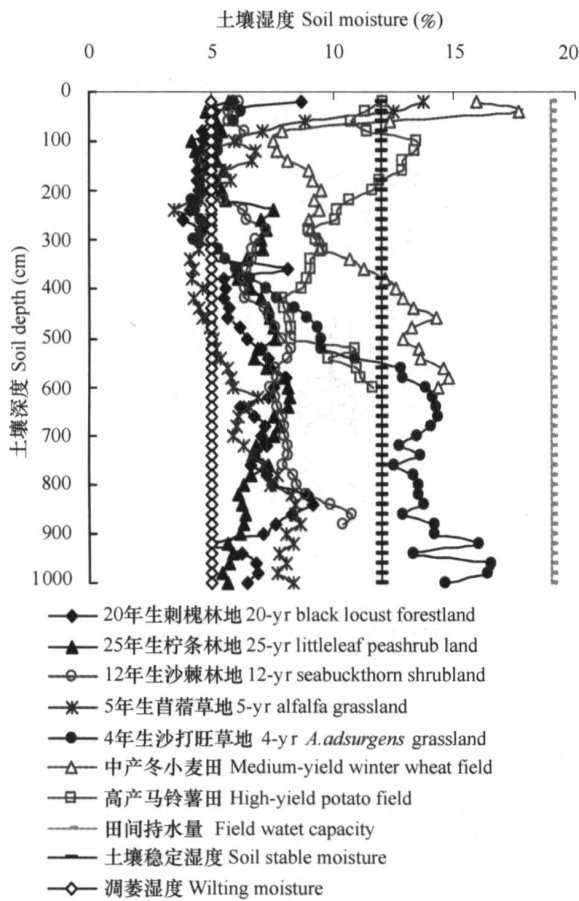


图2 半干旱区林地、草地与农田土壤湿度剖面分布比较

Fig. 2 Soil moisture distribution in forests, grasslands and croplands in the semi-arid zone

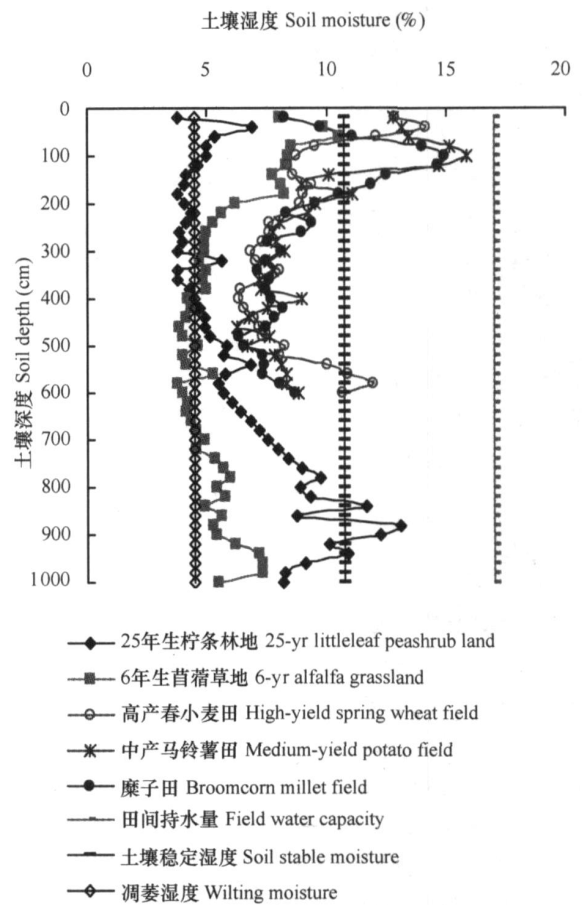


图3 半干旱偏旱区林地、草地与农田土壤湿度剖面分布比较

Fig. 3 Soil moisture distribution in forests, grasslands and croplands in the semi-arid/ arid zone

分布特征和区域分布规律,特此定义了一个定量描述旱地土壤干燥化强度的概念——土壤干燥化指数SDI(soil desiccation index),定义为某一土层实际土壤有效含水量占该层土壤稳定有效含水量比值的百分数,其含义为某一土层可供植物吸收利用的土壤实际有效含水量占该层土壤正常有效含水量的比重,公式表达为:

$$SDI = \frac{SM - WM}{SSM - WM} \times 100\% \quad (1)$$

式中,SDI为土壤干燥化指数,SM为土壤湿度,WM为凋萎湿度,SSM为土壤稳定湿度。土壤湿度、凋萎湿度和土壤稳定湿度用质量含水量百分数或者某一土层的水分毫米数表示。土壤干燥化指数SDI值越小,表明土壤干燥化强度越高,可供植物吸收利用的土壤有效含水量也越少。

依据土壤干燥化指数SDI值的大小,土壤干燥化强度可划分为6级:(1)若SDI=100%,为无干燥

化;(2)若75% SDI < 100%,为轻度干燥化;(3)若50% SDI < 75%,为中度干燥化;(4)若25% SDI < 50%,为严重干燥化;(5)若0% SDI < 25%,为强烈干燥化;(6)若SDI < 0,为极度干燥化。

2 结果与分析

2.1 各类林地、草地和农田0~1000 cm土层土壤贮水量比较

2.1.1 南部半湿润区 南部半湿润区人工苹果园地、油松林地、刺槐林地,天然辽东栎林地、狼牙刺林地和沙棘林地等10类不同生长年限和立地类型林地测深剖面土壤湿度平均值介于9.75%~15.98%,平均值为12.57%(表1),除9年生苹果园地外,其他9类林地土壤湿度值均低于土壤稳定湿度值,表明已经发生了土壤干燥化。10类林地0~1000cm土层土壤贮水量和土壤有效贮水量分别介

于 1 267 ~ 2 065 mm 和 97 ~ 895 mm, 平均值分别为 1 633 mm 和 463 mm。9 类干燥化林地土壤水分过耗量为 403 mm。量(表 1 中以负值表示)介于 161 ~ 748 mm, 平均值为 403 mm。

表 1 黄土高原各类林地、草地和农田 0 ~ 1 000 cm 土层土壤贮水量、土壤水分过耗量、土壤干燥化指数与土壤干层分布深度及其厚度比较

Table 1 Soil water amount, soil water overuse rate, soil desiccation index, distribution depth and thickness of desiccated soil layers in the 0 ~ 1 000 cm soil layers of various forestlands, grasslands and croplands on the Loess Plateau

气候和植被地带 Climate & vegetation zone	土地利用类型 Land use type	土壤湿度测定深度 Depth of soil moisture observation (cm)	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤贮水量 Soil water amount (mm)	土壤有效贮水量 Available soil water amount (mm)	土壤水分过耗量 Soil water overuse rate (mm)	平均土壤干燥化指数 Average soil desiccation index (%)	土壤干层剖面分布深度 Distribution depth of desiccated soil layers (cm)	土壤干层厚度 Thickness of desiccated soil layers (cm)
南部半湿润区 South semi-humid zone	9年生苹果园(洛川) 9-yr apple orchard	1 000	15.98(2.57) *	2 065	895	50	106	120 ~ 420	300
	15年生苹果园(长武) 15-yr apple orchard	1 000	12.39(1.73)	1 611	441	- 404	52	120 ~ 1 000	880
	15年生油松林地, 阳坡(子午岭) 15-yr Chinese pine forestland on south slope	1 000	10.34(2.94)	1 344	174	- 671	21	0 ~ 780 840 ~ 1 000	940
	20年生油松林地, 阴坡(子午岭) 20-yr Chinese pine forestland on north slope	1 000	12.45(1.73)	1 619	449	- 396	53	40 ~ 1 000	960
	20年生刺槐林地, 阴坡(长武) 20-yr black locust forestland on north slope	880	13.35(2.66)	1 735	565	- 280	67	40 ~ 880	840
	23年生刺槐林地, 塬地(长武) 23-yr black locust forestland on tableland	800	12.84(1.79)	1 669	499	- 346	59	60 ~ 760	700
	60年生天然辽东栎林地(子午岭) 60-yr natural Manchurian oak forestland	1 000	13.98(2.34)	1 818	648	- 197	77	120 ~ 240 280 ~ 1 000	840
	70年生天然辽东栎林地(子午岭) 70-yr natural Manchurian oak forestland	1 000	10.37(1.81)	1 348	178	- 667	21	0 ~ 1 000	1 000
	8年生天然狼牙刺林地(子午岭) 8-yr natural David's mountain laurel shrub land	1 000	9.75(2.40)	1 267	97	- 748	11	80 ~ 1 000	920
	20年生天然沙棘林地(子午岭) 20-yr natural seabuckthorn shrub land	1 000	14.26(2.06)	1 854	684	- 161	81	120 ~ 760 900 ~ 1 000	740
	3年生苜蓿草地(长武) 3-yr alfalfa grassland	800	13.37(3.41)	1 738	568	- 278	67	20 ~ 540	520
	6年生苜蓿草地(镇原) 6-yr alfalfa grassland	1 000	10.53(1.62)	1 369	199	- 646	24	20 ~ 1 000	980
	17年生苜蓿草地(镇原) 17-yr alfalfa grassland	1 000	10.65(1.71)	1 385	215	- 630	25	20 ~ 1 000	980
	荒草地(长武) Natural grassland	1 000	18.15(3.02)	2 360	1 190	345	141	0 ~ 60 160 ~ 320	220
	高产麦田(长武) High-yield wheat field	600	12.73(2.27)	1 655	485	- 360	57	40 ~ 600	560
	中产麦田(长武) Medium-yield field	600	16.01(4.36)	2 082	912	67	108	80 ~ 320	240
	低产麦田(长武) Low-yield wheat field	600	17.27(3.67)	2 246	1 076	231	127	80 ~ 300	220
	覆膜玉米田(长武) Film-mulched corn field	600	15.93(1.38)	2 071	901	56	107	0 ~ 120	120
	露地玉米田(长武) Corn field	600	18.05(1.12)	2 347	1 177	332	139	0	0
	16年休闲裸地(长武) 16-yr fallow bare land	1 000	21.80	2 835	1 665	820	197	0	0
	田间持水量 Field water capacity	—	22.00	2 860	1 690	845	200	—	—
	凋萎湿度 Wilting moisture	—	9.00	1 170	0	- 845	0	—	—
	土壤稳定湿度 Soil stable moisture	—	15.50	2 015	845	0	100	—	—

续表

气候和植被地带 Climate & vegetation zone	土地利用类型 Land use type	土壤湿度测定深度 Depth of soil moisture observation (cm)	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤贮水量 Soil water amount (mm)	土壤有效贮水量 Available soil water amount (mm)	土壤水分过耗量 Soil water overuse rate (mm)	平均土壤干燥化指数 Average soil desiccation index (%)	土壤干层剖面分布深度 Distribution depth of soil layers (cm)	土壤干层厚度 Thickness of desiccated soil layers (cm)
中部半干旱区 Middle semi-arid zone	20年生刺槐林地, 东坡(安塞) 20-yr black locust forestland on east slope	1 000	6.23(1.41)	809	159	- 751	18	0~1 000	1 000
	4年生柠条林地(定西) 4-yr littleleaf peashrub land on south slope	800	6.85(0.70)	891	241	- 669	26	0~800	800
	5年生柠条林地(固原) 5-yr littleleaf peashrub land	1 000	8.84(3.68)	1 149	499	- 411	55	0~760	760
	21年生柠条林地, 阴坡(固原) 21-yr littleleaf peashrub land on north slope	1 000	8.03(1.74)	1 043	393	- 604	36	20~980	960
	21年生柠条林地, 阳坡(固原) 21-yr littleleaf peashrub land on south slope	1 000	7.36(1.13)	956	306	- 586	36	20~1 000	980
	25年生柠条林地, 东坡(安塞) 25-yr littleleaf peashrub land on east slope	1 000	6.50(1.00)	846	196	- 714	21	0~1 000	1 000
	12年生沙棘林地, 东坡(安塞) 12-yr seabuckthorn shrubland on east slope	880	7.19(1.39)	934	284	- 626	31	0~880	880
	3年生苜蓿草地(固原) 3-yr alfalfa grassland	1 000	10.14(2.61)	1 319	669	- 241	73	0~420	420
	5年生苜蓿草地(固原) 5-yr alfalfa grassland	1 000	6.45(2.02)	838	188	- 722	21	60~1 000	940
	5年生苜蓿草地(定西) 5-yr alfalfa grassland	1 000	9.65(1.60)	1 254	604	- 306	66	40~1 000	960
	10年生苜蓿草地(固原) 10-yr alfalfa grassland	1 000	9.23(2.99)	1 200	550	- 360	60	100~320 420~1 000	800
	20年生苜蓿草地(定西) 20-yr alfalfa grassland	900	8.82(1.82)	1 147	497	- 413	55	60~900	840
	3年生沙打旺草地, 北坡(安塞) 3-yr <i>A. adsurgens</i> grassland on north slope	1 000	8.18(1.92)	1 063	413	- 497	45	0~540 600~1 000	940
	4年生沙打旺草地, 西坡(安塞) 4-yr <i>A. adsurgens</i> grassland on west slope	1 000	9.91(4.24)	1 288	638	- 272	70	0~520	520
	天然荒草地 Natural grassland	600	11.45(4.34)	1 488	838	- 72	92	40~380	340
	中产春小麦田(定西) Medium-yield spring wheat field	600	13.56(2.27)	1 763	1 113	203	122	60~120 200~280	140
	梯田马铃薯田(定西) Potato field, terraced	600	15.38(2.82)	2 000	1 350	440	148	120~160	40
	中产冬小麦田(固原) Medium winter wheat field	600	11.50(2.72)	1 494	844	- 66	93	60~360	300
	覆膜冬小麦(固原) Film mulched winter wheat field	600	11.49(2.57)	1 494	844	- 66	93	80~500	420
	高产马铃薯田(固原) High-yield potato field	600	10.39(1.66)	1 351	701	- 209	77	20~80 160~600	500
	低产马铃薯田(固原) Low-yield potato field	600	12.54(2.49)	1 631	981	71	108	40~300	260
	糜子田(固原) Broomcorn millet field	600	11.93(2.94)	1 551	901	- 9	99	20~300	280
	覆膜玉米田(固原) Film mulched corn field	600	11.12(1.18)	1 446	796	- 114	87	0~60 200~600	460
	田间持水量 Field water capacity	—	19.00	2 470	1 820	910	200	—	—
	凋萎湿度 Wilting moisture	—	5.00	650	0	0	0	—	—
	土壤稳定湿度 Soil stable moisture	—	12.00	1 560	910	0	100	—	—

续表

气候和植被地带 Climate & vegetation zone	土地利用类型 Land use type	土壤湿度测定深度 Depth of soil moisture observation (cm)	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤贮水量 Soil water amount (mm)	土壤有效贮水量 Available soil water amount (mm)	土壤水分过耗量 Soil water overuse rate (mm)	平均土壤干燥化指数 Average soil desiccation index (%)	土壤干层剖面分布深度 Distribution depth of desiccated soil layers (cm)	土壤干层厚度 Thickness of desiccated soil layers (cm)
北部半干旱偏旱区 North semi-arid/arid zone	25年生柠条林地(海原) 25-yr littleleaf peashrub land	1 000	6.46(2.49)	840	255	- 557	31	0~820 900~1 000	920
	3年生苜蓿草地(海原) 3-yr alfalfa grassland	1 000	7.96(4.11)	1 035	450	- 363	55	40~760	720
	6年生苜蓿草地(海原) 6-yr alfalfa grassland	1 000	5.70(1.67)	741	156	- 656	19	0~1 000	1 000
	10年生苜蓿草地(海原) 10-yr alfalfa grassland	1 000	5.82(2.07)	757	172	- 640	21	0~1 000	1000
	天然荒草地(海原) Natural grassland	1 000	9.58(3.82)	1 245	660	- 152	81	0~580	580
	低产春小麦田(海原) Low-yield spring wheat field	600	9.37(2.70)	1 218	633	- 179	78	0~600	600
	高产春小麦田(海原) High-yield spring wheat field	600	8.76(2.00)	1 139	554	- 258	68	60~540	480
	低产马铃薯田(海原) Low-yield potato field	600	10.01(4.16)	1 301	716	- 97	88	200~600	400
	中产马铃薯田(海原) Medium-yield potato field	600	9.37(2.70)	1 218	633	- 179	78	120~600	480
	糜子田(海原) Broomcorn millet field	600	9.07(2.37)	1 179	594	-216	73	160~600	440
	田间持水量 Field water capacity	—	17.00	2 210	1 625	813	200	—	—
	凋萎湿度 Wilting moisture	—	4.50	585	0	- 813	0	—	—
	土壤稳定湿度 Soil stable moisture	—	10.75	1 398	813	0	100	—	—

注:在土壤湿度一列中,括号外数据为测深剖面土壤湿度平均值,括号内数据为剖面土壤湿度标准差 Note: In soil moisture column, data outside parentheses is average soil moisture of observed soil profile, and data inside parentheses is standard deviation of soil moisture in the soil profile

南部半湿润区 3 类不同生长年限的苜蓿草地土壤湿度平均值介于 10.53%~13.37%, 平均值为 11.52%, 均低于土壤稳定湿度值, 均已发生了土壤干燥化。3 类苜蓿草地 0~1 000 cm 土层土壤贮水量和土壤有效贮水量分别介于 1 369~1 736 mm 和 199~568 mm, 平均值分别为 1 497 mm 和 327 mm。干燥化草地土壤水分过耗量介于 278~646 mm, 平均值为 518 mm。本区天然荒草地土壤湿度为 18.15%, 高于土壤稳定湿度值, 尚未发生土壤干燥化。

南部半湿润区 5 类不同产量水平的冬小麦田和春玉米田 0~600 cm 土层土壤湿度平均值介于 12.73%~18.05%, 平均值为 16.00%, 除高产麦田低于土壤稳定湿度值外, 其他均高于土壤稳定湿度值, 尚未发生土壤干燥化。5 类粮田 0~1 000 cm 土层土壤贮水量和土壤有效贮水量分别介于 1 655~2 347 mm 和 485~1 177 mm, 平均值分别为 2 080 mm 和 910 mm。高产麦田土壤水分过耗量 360 mm, 其

他 4 类未干燥化粮田土壤贮水量高出土壤稳定贮水量 56~332 mm, 平均值 171 mm。

2.1.2 中部半干旱区 中部半干旱区刺槐、柠条、沙棘等 7 类人工林地土壤湿度介于 6.23%~8.84%, 平均值为 7.29%, 均低于土壤凋萎湿度值 12.00%, 均发生了明显土壤干燥化, 土壤贮水量和土壤有效贮水量分别介于 809~1 149 mm 和 159~499 mm, 平均值分别为 947 mm 和 297 mm, 林地土壤水分过耗量为 411~751 mm, 平均值 623 mm。

中部半干旱区苜蓿和沙打旺等 7 类人工草地土壤湿度介于 6.45%~11.14%, 平均值为 8.91%, 均低于当地土壤稳定湿度值, 也发生了明显土壤干燥化, 土壤贮水量和土壤有效贮水量分别介于 838~1 319 mm 和 188~669 mm, 平均值分别为 1 158 mm 和 508 mm, 林地土壤水分过耗量为 241~722 mm, 平均值 402 mm。本区天然荒草地土壤湿度测深只有 600 cm, 土壤湿度为 11.45%, 也发生了土壤干燥化,

土壤水分过耗量 72 mm。如果测深达到 1 000 cm,估计荒草地土壤湿度值不会低于 12.00%,则不存在土壤干燥化现象。

中部半干旱区春小麦、马铃薯、冬小麦、糜子和玉米等 8 类旱作粮田 0~600 cm 土层土壤湿度为 10.39%~15.38%,平均值为 12.24%。0~1 000 cm 土层土壤贮水量和土壤有效贮水量分别介于 1 351~2 000 mm 和 701~1 350 mm,平均值分别为 1 591 mm 和 941 mm。在 8 类粮田中,固原中产冬小麦、覆膜冬小麦、高产马铃薯、糜子和覆膜玉米等 5 类粮田土壤湿度低于土壤稳定湿度值,表明均发生了土壤干燥化,5 类干燥化粮田土壤水分过耗量 9~209 mm,平均值为 93 mm。其他 3 类未干燥化粮田土壤贮水量高出土壤稳定贮水量 71~440 mm,平均值 238 mm。

2.1.3 北部半干旱偏旱区 在北部半干旱偏旱区的海原、柠条林地 0~1 000 cm 土层土壤湿度、土壤贮水量、土壤有效贮水量分别为 6.46%、841 mm 和 255 mm,土壤水分过耗量为 557 mm。3 类苜蓿草地土壤湿度和土壤水分过耗量分别为 5.70%~7.98% 和 363~656 mm,平均值分别为 6.49% 和 553 mm。本区天然荒草地土壤湿度和土壤水分过耗量分别为 9.58% 和 152 mm。春小麦、马铃薯和糜子等 5 类旱作粮田土壤湿度和土壤水分过耗量分别为 8.76%~10.01% 和 97~258 mm,平均值分别为 9.32% 和 186 mm。本区人工林地、人工草地、天然旱作农田土壤湿度均低于土壤稳定湿度值,表明均已发生了明显的土壤干燥化。

2.1.4 不同类型区林地、草地和农田比较 将不同降水类型区各类林地、草地和农田土壤湿度、土壤贮水量和土壤水分过耗量平均值比较于表 2。在南部半湿润区,林地、草地和农田土壤湿度平均值依次为 12.57%、11.52% 和 16.00%,林地和草地土壤水分过耗量依次为 382 mm、518 mm,而农田土壤水分高出土壤稳定贮水量 65 mm。草地土壤湿度最低,土壤水分过耗量最大,其次为林地,农田最高,整体平均未发生土壤干燥化。

在中部半干旱区,林地、草地和农田土壤湿度平均值依次为 7.29%、8.91% 和 12.24%,林地和草地土壤水分过耗量依次为 623 mm、402 mm,农田土壤水分超出量 31 mm。林地土壤湿度最低,土壤水分过耗量最大,其次为草地,而农田整体平均未发生土壤干燥化。

在北部半干旱偏旱区,林地、草地和农田土壤湿度平均值依次为 6.46%、6.49% 和 9.32%,土壤水分

过耗量依次为 557 mm、553 mm 和 186 mm,林地和草地土壤湿度相当,农田较高,但均发生了土壤干燥化。

相同土地利用方式相比,半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区林地土壤湿度平均值依次为 12.57%、7.29% 和 6.46%,以半干旱偏旱区最低、半湿润区最高,林地土壤水分过耗量依次为 382 mm、623 mm 和 557 mm,以半干旱区最高、半湿润区最低。半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区草地土壤湿度平均值依次为 11.52%、8.91% 和 6.49%,以半干旱偏旱区最低、半湿润区最高,草地土壤水分过耗量依次为 518 mm、402 mm 和 553 mm,以半干旱区较低,半湿润区和半干旱偏旱区相当且较高。半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区农田土壤湿度平均值依次为 16.00%、12.24% 和 9.32%,以半干旱偏旱区最低、半湿润区最高,半湿润区与半干旱区农田均未发生干燥化,农田土壤水分过耗量依次为未过耗、未过耗和 186 mm,半干旱偏旱区最高。

2.2 各类林地、草地和农田土壤干燥化指数和土壤干层特征比较

2.2.1 南部半湿润区 南部半湿润区苹果、油松、刺槐、辽东栎、狼牙刺和沙棘等 10 类林地土壤干燥化指数为 11%~106%,平均值为 55%,除 9 年生苹果园地未发生干燥化外,其他均发生了程度不同的土壤干燥化,分别属于强烈干燥化、中度干燥化和轻度干燥化强度,10 类林地平均属于中度干燥化强度(表 1)。10 类林地平均土壤干层剖面分布深度平均值为 70~906 cm,土壤干层厚度平均值为 812 cm(表 2)。3 类苜蓿草地土壤干燥化指数为 24%~67%,平均值为 39%,平均属于严重干燥化强度,草地土壤干层分布深度为 20~847 cm,土壤干层厚度平均为 827 cm。5 类旱作粮田土壤干燥化指数为 57%~197%,平均值为 108%,除高产麦田达到中度干燥化强度外,其他农田均属于无干燥化强度。5 类粮田土壤干层分布深度为 40~268 cm,土壤干层厚度为 228 cm。半湿润区典型林地、草地和农田土壤湿度剖面分布特征比较于图 1。除覆膜玉米田外,各类典型林地、草地和农田 200 cm 以下深层土壤湿度剖面分布均介于土壤稳定湿度与凋萎湿度之间。

2.2.2 中部半干旱区 中部半干旱区刺槐、柠条、沙棘等 7 类林地土壤干燥化指数为 18%~55%,平均值为 32%,均发生了程度不同的土壤干燥化,分别属于强烈干燥化、严重干燥化和中度干燥化强

度,7类林地平均属于严重干燥化强度。7类林地土壤干层剖面分布深度平均值为6~917 cm,土壤干层厚度平均值为911 cm(表2)。苜蓿和沙打旺等7类草地土壤干燥化指数为21%~73%,平均值为56%,均发生了程度不同的土壤干燥化,分别属于强烈干燥化、严重干燥化和中度干燥化强度,平均属于中度干燥化强度。7类草地土壤干层剖面分布深度平均值为37~706 cm,土壤干层厚度平均值为774 cm,其中苜蓿草地干层分布深度和厚度均远大于沙打旺草地,苜蓿草地分别为43~887 cm和817 cm,

而沙打旺草地分别为20~450 cm与430 cm。8类旱作农田土壤干燥化指数为77%~148%,平均值为103%,分别属于轻度干燥化和无干燥化强度,平均属于无干燥化强度。8类农田土壤干层剖面分布深度平均值为50~388 cm,土壤干层厚度平均值为300 cm。半干旱区典型林地、草地和农田土壤湿度剖面分布特征比较于图2。除中产麦田和沙打旺草地深层土壤湿度较高外,其他各类林地、草地和农田土壤湿度介于土壤稳定湿度与凋萎湿度之间,且在100~400 cm土层形成了低于凋萎湿度的极度干燥层。

表2 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田0~1 000 cm土层土壤贮水量、土壤水分过耗量、土壤干燥化指数、土壤干层分布深度及其厚度平均值比较

Table 2 Average soil water amount, soil water overuse rate, soil desiccation index, distribution depth and thickness of desiccated soil layers in the 0~1 000 cm soil layers of forestlands, grasslands and croplands in zones different in rainfall pattern on the Loess Plateau

气候与土地利用类型 Climate and land use type	土壤湿度 测定深度 Depth of soil moisture observation (cm)	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤贮 水量 Soil water amount (mm)	土壤有效 贮水量 Available soil water amount (mm)	土壤水分 过耗量 Soil water overuse rate (mm)	平均土壤干 燥化指数 Average soil desiccation index (%)	土壤干层剖 面分布深度 Distribution depth of des- iccated soil layers (cm)	土壤干层 厚度 Thickness of desiccated soil layers (cm)
半湿润区林地 Forestlands in the semi-humid zone	968	12.57(1.97)*	1 633 (254)	463(254)	- 382 (254)	55(30)	70~906	812(203)
半湿润区草地 Grasslands in the semi-humid zone	933	11.52(1.61)	1 497 (208)	327 (208)	- 518(208)	39(25)	20~847	827(266)
半湿润区农田 Croplands in the semi-humid zone	600	16.00(2.03)	2 080 (264)	910 (264)	65 (264)	108(31)	40~268	228(209)
半干旱区林地 Forestlands in the semi-arid zone	954	7.29(0.90)	947(118)	297(118)	- 623(111)	32(12)	6~917	911(99)
半干旱区草地 Grasslands in the semi-arid zone	985	8.91(1.28)	1 158 (166)	508 (166)	- 402(166)	56(18)	37~706	774(218)
半干旱区农田 Croplands in the semi-arid zone	600	12.24(1.58)	1 591 (206)	941 (206)	31 (206)	103(23)	50~388	300(158)
半干旱偏旱区林地 Forestlands in the semi-arid/ arid zone	1 000	6.46	840	255	- 557	31	0~1 000	920
半干旱偏旱区草地 Grasslands in the semi-arid/ arid zone	1 000	6.49(1.27)	844 (165)	259 (165)	- 553 (165)	32(20)	13~920	907(162)
半干旱偏旱区农田 Croplands in the semi-arid/ arid zone	600	9.32(0.46)	1 211 (60)	626 (60)	- 186 (60)	77(7)	108~588	480(75)

注:括号外数据为平均值,括号内数据为标准差 Note: data outside parentheses is average value, and date inside parentheses is standard deviation

2.2.3 北部半干旱偏旱区 北部半干旱偏旱区海原柠条林地土壤干燥化指数、土壤干层分布深度和厚度依次为31%、0~1 000 cm和920 cm,属于严重干燥化强度。3类苜蓿草地土壤干燥化指数为21%~55%,平均值为32%,分别属于强烈干燥化和中度干燥化,平均为严重干燥化。3类苜蓿草地土壤干层剖面分布深度平均值为13~920 cm,土壤干

层厚度平均值为907 cm。5类旱作农田土壤干燥化指数为73%~88%,平均值为77%,分别属于中度和轻度干燥化强度,平均属于轻度干燥化强度。5类农田土壤干层剖面分布深度平均值为108~588 cm,土壤干层厚度平均值为408 cm。半干旱偏旱区典型林地、草地和农田土壤湿度剖面分布特征比较于图3。除高产麦田和柠条林地深层土壤湿度高于

土壤稳定湿度外,其他林地、草地和农田土壤湿度均低于土壤稳定湿度值,其中柠条林地和苜蓿草地在 100~700 cm 土层土壤湿度接近或低于凋萎湿度值。

2.2.4 不同类型区林地、草地和农田比较 在南部半湿润区,林地、草地和农田土壤干燥化指数依次为 55%、39%和 108%,分别属于中度干燥化、严重干燥化和无干燥化强度,草地土壤干燥化程度最严重(表 2)。林地、草地和农田土壤干层分布深度依次为 70~906 cm、20~847 cm 和 40~268 cm,土壤干层厚度依次为 812 cm、827 cm 和 228 cm,林地和草地相当且较深,农田较浅。

在中部半干旱区,林地、草地和农田土壤干燥化指数依次为 32%、56%和 103%,分别属于严重干燥化、中度干燥化和无干燥化强度,林地土壤干燥化程度最严重,草地相对较轻。林地、草地和农田土壤干层分布深度依次为 6~917 cm、37~706 cm 和 50~388 cm,土壤干层厚度依次为 911 cm、774 cm 和 300 cm,林地最深,草地居中,农田最浅。

在北部半干旱偏旱区,林地、草地和农田土壤干燥化指数依次为 31%、32%和 77%,分别属于严重干燥化、严重干燥化和轻度干燥化强度,林地和草地土壤干燥化程度均十分严重。林地、草地和农田土壤干层分布深度依次为 0~1 000 cm、13~920 cm 和 108~588 cm,土壤干层厚度依次为 920 cm、907 cm 和 480 cm,林地和草地相当且较深,农田较浅。

相同土地利用方式相比,半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区林地土壤干燥化指数平均值依次为 55%、32%和 31%,半干旱区和半干旱偏旱区相当且最低,均为严重干燥化强度,半湿润区最高,为中度干燥化强度,林地土壤干层厚度依次为 812 cm、911 cm 和 920 cm,半干旱区和半干旱偏旱区相当且较厚,半湿润区相对较浅。半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区草地土壤干燥化指数平均值依次为 39%、56%和 32%,半湿润区和半干旱偏旱区相当且最低,均为严重干燥化强度,半干旱区最高,为中度干燥化强度,草地土壤干层厚度依次为 827 cm、774 cm 和 907 cm,半干旱偏旱区最厚,半湿润区居中,半干旱区相对较浅。半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区农田土壤干燥化指数平均值依次为 108%、103%和 77%,半湿润区和半干旱区相当且较高,均为无干燥化强度,半干旱偏旱区最低,为轻度干燥化强度,农田土壤干层厚度依次为 228 cm、300 cm 和 480 cm,随降水量减少农田土壤干层厚度趋于增加。

3 结 论

在黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区,各类林地、草地和农田 0~10 m 土层普遍发生了不同程度的土壤干燥化;林地和草地平均土壤水分过耗量超过或者接近 500 mm,平均土壤干层厚度超过了 800 cm,为严重干燥化强度,而农田平均土壤水分过耗量为 30 mm,土壤干层厚度超过 300 cm,为轻度干燥化强度;即随降水量减少土壤干燥化程度趋于加剧,半干旱偏旱区土壤干燥化程度最严重,其次为半干旱区,半湿润区相对较轻。

参 考 文 献

- [1] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2): 91~101. Li Y S. Characters of soil water cycling and its influences on land water cycling of the loess region of China (In Chinese). Acta Ecol. Sin., 1983, 3(2): 91~101
- [2] 杨维西. 试论我国北方地区人工林植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32(1): 78~84. Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern region of China (In Chinese). Sci. Silvae Sin., 1996, 32(1): 78~84
- [3] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. Wu Q X, Yang W Z. The Vegetation Construction and Sustainable Development of the Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998
- [4] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. 中国水土保持, 1999(5): 11~14. Hou Q C, Han R L, Han S F. Initial research on “dried soil layer” of artificial forestland and grassland in Loess Plateau (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1999(5): 11~14
- [5] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化. 土壤学报, 2001, 38(3): 353~356. Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of soil on dryland (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 353~356
- [6] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 2002, 39(3): 404~411. Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effect on water eco-environment (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3): 404~411
- [7] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000. Yang W Z, Shao M A. Research on Soil Water of the Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [8] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433~438. Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 433~438
- [9] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427~432. Li Y S. Effects of forest on water cycle on the Loess Plateau (In Chinese). Journal of Natural Re-

- sources, 2001, 16(5):427~432
- [10] 穆兴民,徐学选,王文龙,等.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响.土壤学报,2003,40(2):210~217. Mu X M, Xu X X, Wang W L, et al. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2):210~217
- [11] 陈云明,刘国彬,杨勤科.黄土高原人工林土壤水分的地带性特征.自然资源学报,2004,19(2):195~200. Chen Y M, Liu G B, Yang Q K. Zonal characteristics of artificial forest effecting soil moisture on Loess Plateau (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2004, 19(2):195~200
- [12] 黄明斌,党廷辉,李玉山.黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响.农业工程学报,2002,18(6):50~54. Huang M B, Dang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the loess plateau on soil water cycle (In Chinese). Transaction of the CSAE, 2002, 18(6):50~54
- [13] 樊军,郝明德,邵明安.黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应.农业工程学报,2004,20(1):61~65. Fan J, Hao M D, Shao M A. Deep soil water consumption and water eco-environment on dryland agro-ecosystem of the Loess Plateau (In Chinese). Transaction of the CSAE, 2004, 20(1):61~65
- [14] 黄明斌,杨新民,李玉山.黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究.中国生态农业学报,2003,11(3):113~116. Huang M B, Yang X M, Li Y S. Hydro-ecological effect of the soil dry layer as affected by biota use in the Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3):113~116
- [15] 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源.土壤学报,2004,41(1):1~6. Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):1~6
- [16] 程积民,万惠娥,王静,等.半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究.林业科学,2005,41(2):37~41. Cheng J M, Wan H E, Wang J, et al. Growth of *Caragana microphylla* and depletion process of soil water in semi-arid region (In Chinese). Sci. Silvae Sin., 2005, 41(2):37~41
- [17] Stone L R, Godrum D E, Schlehlel A J, et al. Water depletion depth of grain sorghum and sunflower in the Central High Plains. Agron. J., 2002, 94:936~943
- [18] William J B, Martin H E. Soil water dynamic after alfalfa as influenced by crop termination technique. Agron. J., 1999, 91:294~305
- [19] Greb B W. Reducing Drought Effects on Croplands in the West Central Great Plains. USDA Inf. Bull. 420. Gov. Print Office, Washington, D C. 1979

SOIL DESICCATING EFFECTS OF FORESTLANDS, GRASSLANDS AND CROPLANDS IN ZONES DIFFERENT IN RAINFALL PATTERN ON THE LOESS PLATEAU

Li Jun^{1,2} Chen Bing^{1,4} Li Xiaofang¹ Zhao Yujuan³ Cren Yangjin¹ Jiang Bin³ Hu Wei¹

(1 College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 Scientific and Technological Innovation Center of Farm Management of Hainan, Haikou 570206, China)

Abstract Soil desiccation is a prominent in artificial forestlands, grasslands and croplands on the Loess Plateau, seriously threatening the effects of revegetation and sustainable development of dryland farming. Based on observation of soil moisture in deep soil layers in 53 different kinds of forestlands, grasslands and croplands in semi-humid zone, semi-arid zone and semi-arid/ arid zone of the Loess Plateau, soil moisture contents, soil water overuse rate, soil desiccation indexes and thickness of desiccated soil layers in these areas various forestlands, grasslands and croplands were calculated, analyzed and compared. Results show as follows: 1) Mean soil moisture contents of forestlands, grasslands and croplands were in the range of 6.46%~12.57%, 6.49%~11.52% and 9.32%~16.00%, respectively; with the highest in the semi-humid zone, and the lowest in the semi-arid/ arid zone. The average soil water overuse rate of forestlands, grasslands and croplands was 521 mm, 491 mm, and 30 mm, respectively, and the highest among the forestlands was in the semi-arid zone, and the highest among the grasslands in the semi-humid zone and semi-arid/ arid zone, and the highest among the croplands in the semi-arid/ arid zone. 2) The average soil desiccation index of the forestlands, grasslands and croplands was 39%, 42% and 96%, respectively, falling into the category of severely desiccated, severely desiccated and slightly desiccated, separately. The most severely desiccated forestland soils were in the semi-arid zone and semi-arid/ arid zone, the most severely desiccated grassland soils in the semi-humid zone and semi-arid/ arid zone, and the most severely desiccated cropland soils were in the semi-arid/ arid zone. The average thickness of the desiccated soil layers in forestlands, grasslands and croplands was 881 cm, 836 cm and 336 cm, respectively. The thickest desiccated soil layers of forestlands were in the semi-arid zone and semi-arid/ arid zone, and of grasslands and croplands in the semi-arid/ arid zone.

Key words The Loess Plateau; Forestland; Grassland; Cropland; Soil moisture; Soil desiccation; Desiccated soil layer