

黄土高原不同类型旱区旱作粮田深层土壤干燥化特征

李 军^{1,2}, 蒋 斌³, 胡 伟¹, 次仁央金¹, 赵玉娟³, 李晓芳¹, 陈 兵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 资环学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 随降水量趋势性减少和粮食产量不断提高, 黄土高原旱作粮田深层土壤干燥化现象日益显现。在黄土高原不同类型旱区, 测定了 32 类旱作粮田 0~600 cm 土层土壤湿度, 分析和比较了各类粮田深层土壤贮水量、土壤湿度剖面分布和土壤干燥化强度。结果表明: 32 类旱作粮田 0~600 cm 土层土壤湿度、土壤贮水量和土壤有效贮水量分别为 13.90%、1 084.4 mm 和 573.7 mm, 其中有 16 类粮田发生了土壤干燥化现象, 土壤水分过耗量平均值 85.1 mm; 有 28 类旱作粮田 100~400 cm 土层为土壤干层, 其中夏粮田土壤干层厚度大于秋粮田, 最大耗水深度接近或超过 600 cm; 32 类旱作粮田和 16 类干燥化粮田土壤干燥化指数分别为 110% 和 83%, 分别属于无干燥化和轻度干燥化强度, 土壤干层厚度平均值为 267 cm, 以半干旱偏旱区粮田土壤干燥化程度最严重。

关键词: 黄土高原; 旱作粮田; 土壤湿度; 土壤干燥化

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2009)12-2124-11

近 20 多年来, 随着旱作农业技术的不断进步, 黄土高原旱作粮田作物产量持续提高^[1-2]。但随着气候干旱化趋势加剧和粮食产量不断增加, 旱作粮田土壤干燥化现象日益显现, 导致了农作物产量波动性加剧^[3-9]。目前, 除了长武旱塬轮作和培肥长期定位试验土壤干燥化现象外^[4-7], 在大田生产条件下的旱作粮田是否存在土壤干燥化现象, 尚未见到相关报道。在常规旱作农业试验研究中, 由于对旱作粮田土壤湿度观测深度通常不超过 2 m, 未能反映旱作粮田深层土壤水分利用特征^[1-3], 同时也缺乏对不同降水类型区和不同类型旱作粮田土壤干燥化强度的定量比较研究。本研究通过对不同降水类型旱区旱作粮田深层土壤湿度观测和分析, 试图揭示和评价黄土高原主要类型旱作粮田深层土壤干燥化特征, 为黄土高原旱作粮田土壤水分可持续利用和旱作农业发展提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

按照黄土高原旱作农业分区, 本研究选择了黄土高原南部半湿润区的长武、镇原和宜君, 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 7 个代表点, 实地观测和评价旱作粮田土壤干燥化状况。在南部半湿润区 3 个观测点, 年均气温 9.0~9.2℃, 10 积温 2 998~3 026.0℃, 年降水量 576.4~620.0 mm, 年蒸发量 1 481.6~1 637.5 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

收稿日期: 2007-09-10; 修订日期: 2009-08-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771280; 30471024; 40371077)。

第一作者简介: 李军(1964-), 男, 甘肃涇川人, 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的研究与教学工作。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

6.1~8.8, 10 积温 2 239.1~3 177.4, 年降水量 425.1~505.3 mm, 年蒸发量 1 489.1~1 772.5 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 2 392.3, 年降水量 386.1 mm, 年蒸发量 2 157.4 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 1.30 g/cm³。

1.2 粮田土壤湿度测定方法

于 2005年 8月中下旬相继在长武、镇原、宜君、定西、固原、安塞、海原等实验站选择具有代表性的小麦、玉米、马铃薯、谷子、糜子、大豆等 32类不同产量水平和栽培方式的旱作粮田进行深层土壤水分测定。土壤湿度测定采用土钻取样、烘干法测定, 测定取土深度范围为 600 cm, 每 20 cm 取样一次, 在 105 烘干至恒重, 分别称量湿土重、干土重和铝盒重, 最后计算各层土壤重量含水量。具体测定粮田选择情况如下:

(1) 南部半湿润区: 在地处黄土高原南部的长武塬、董志塬和宜君塬分别测定了不同产量水平和栽培方式下的小麦、玉米等 13类旱作粮田地 0~600 cm 土层土壤湿度。

(2) 中部半干旱区: 在地处黄土高原中部丘陵区的甘肃农业科学院定西旱作农业试验站、中国科学院水利部水土保持研究所宁夏固原(上黄)农业生态试验站和陕西安塞水土保持综合试验站, 观测了不同产量水平和农田类型的春小麦、春玉米、马铃薯等 14类粮田 0~600 cm 土层土壤湿度。

(3) 北部半干旱偏旱区: 在地处黄土高原北部丘陵区的西北农林科技大学宁夏海原(贾塘)旱作农业试验站, 测定了春小麦、春糜子、马铃薯等 5类旱作粮田 0~600 cm 土层土壤湿度。

1.3 土壤干燥化强度评价方法

在黄土高原半湿润和半干旱区, 通常利用土壤稳定湿度值作为判别旱地土壤干燥化的上限指标^[3], 但土壤稳定湿度值不易准确测定和界定。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%^[10]。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%。

为了便于定量描述土壤干燥化强度、比较旱地土壤干层的剖面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)^[10], 定义为某一土层实际土壤有效含水总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作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, 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重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, 可供作物吸收利用的土壤有效含水总量也越少。

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: 若 $SDI = 100\%$, 为无干燥化; 若 $75\% < SDI < 100\%$, 为轻度干燥化; 若 $50\% < SDI < 75\%$, 为中度干燥化; 若 $25\% < SDI < 50\%$, 为严重干燥化; 若 $0 < SDI < 25\%$, 为强烈干燥化; 若 $SDI < 0$, 为极度干燥化。

2 结果与分析

2.1 0~600 cm 土层土壤贮水量

2.1.1 南部半湿润区

在黄土高原南部半湿润区旱塬地,6类旱作冬小麦茬地、5类旱作春玉米田、2类复种秋粮田 0~600 cm 土层土壤湿度介于 12.90%~19.85% (表 1),平均值 16.23%,土壤贮水量介于 1 006.4~1 548.6 mm,平均值 1 265.9 mm,土壤有效贮水量介于 304.0~846.6 mm,平均值 563.9 mm。长武高产麦田、镇原高产和中产麦田以及复种二熟粮田等土壤湿度均低于土壤稳定湿度值 15.50%,均发生了程度不同的土壤干燥化现象,土壤水分过耗量介于 2.6~202.6 mm,平均值为 74.6 mm。其中,长武连作高产麦田土壤水分过耗量超过 200 mm,镇原高产麦田超过 100 mm,镇原复种二熟粮田超过 20 mm。低产麦田和各类玉米田土壤湿度均高于土壤稳定湿度值,表明尚未发生土壤干燥化现象。从各类粮田土壤湿度值看,秋粮田土壤湿度平均值为 16.77%,高于夏粮田的 16.24%,一熟秋粮田平均湿度值 17.43%,高于二熟秋粮田 15.14%。6类麦田 0~600 cm 土层土壤湿度、土壤贮水量和有效贮水量平均值分别为 15.60%、1 217.07 mm 和 515.07 mm,7类秋粮田平均值为 16.77%、1 308.4 mm 和 606.4 mm,夏粮田低于秋粮田。同时,随麦田产量水平提高,旱塬地冬小麦田呈现土壤湿度逐渐降低和土壤干燥化加剧趋势。各类农田土壤湿度平均值接近于荒草地土壤湿度 (16.38%),均低于休闲裸地土壤湿度 (21.69%)。

2.1.2 中部半干旱区

在中部半干旱区,春小麦、冬小麦、豌豆、马铃薯、糜子、谷子和玉米等 14类旱作粮田 0~600 cm 土层土壤湿度介于 10.39%~18.63% (表 1),平均值 13.41%,土壤贮水量介于 810.8~1 453.1 mm,平均值 1 046.0 mm,土壤有效贮水量介于 420.8~1 063.1 mm,平均值 656.0 mm。固原覆膜冬小麦田、露地冬小麦田、高产马铃薯田、糜子田、覆膜玉米田和定西梯田豌豆田等 6类粮田土壤湿度均低于土壤稳定湿度值 12.00%,均发生了不同程度土壤干燥化,土壤水分过耗量介于 5.6~125.2 mm,平均值为 65.5 mm。固原 6类粮田土壤湿度、土壤贮水量和有效贮水量平均值分别为 11.50%、896.7 mm 和 506.7 mm,定西 5类粮田分别为 14.49%、1 130.3 mm 和 740.3 mm,安塞 3类粮田分别为 15.43%、1 203.6 mm 和 813.6 mm,固原最低,定西居中,安塞最高。5类夏粮田土壤湿度、土壤贮水量和有效贮水量平均值分别为 12.29%、958.2 mm 和 568.2 mm,9类秋粮田为 14.03%、1 094.5 mm 和 704.5 mm,夏粮田低于秋粮田。

2.1.3 北部半干旱偏旱区

在半干旱偏旱区海原,春小麦、马铃薯和糜子等 5类粮田 0~600 cm 土层土壤湿度介于 8.76%~9.84% (表 1),平均值 9.23%,土壤贮水量介于 683.5~767.6 mm,平均值 719.9 mm,土壤有效贮水量介于 332.5~416.6 mm,平均值 368.9 mm,土壤水分过耗量介于 70.9~155.0 mm,平均值 118.6 mm。海原 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现象,土壤水分过耗量超过了 100 mm。但粮田土壤湿度均高于荒草地土壤湿度。此外,夏粮田土壤湿度 (9.03%)稍低于秋粮田 (9.35%)。

2.1.4 不同类型旱区比较

3个类型旱区相比 (表 1),南部半湿润区、中部半干旱区和北部半干旱偏旱区各类粮田 0~600 cm 土层土壤湿度平均值依次为 16.23%、13.41%和 9.23%,0~600 cm 土层土壤贮水量平均值依次为 1 265.9、1 046.0和 719.9 mm,土壤有效贮水量平均值依次为 563.9、656.0和

368.9 mm,土壤有效贮水量以半干旱区最高,其次为半湿润区,半干旱偏旱区最低。

表 1 黄土高原不同类型旱区旱作粮田和荒草地 0 ~ 600 cm 土层土壤贮水量比较

Table 1 Comparison of soil water amount in 0 - 600 cm soil layers on grain croplands and natural grasslands of different rainfall areas on the Loess Plateau

旱作农业区	粮田类型	土壤湿度平均值 / %	土壤贮水量 / mm	土壤有效贮水量 / mm	土壤水分过耗量 / mm
南部半湿润区	长武高产麦田	12.90	1 006.4	304.4	202.6
	长武中产麦田	16.01	1 249.0	547.0	- 40.0
	长武低产麦田	17.27	1 347.4	645.4	- 138.4
	镇原高产麦田	14.06	1 097.0	395.0	112.0
	镇原低产麦田	15.47	1 206.4	504.4	2.6
	宜君低产麦田	17.90	1 396.2	694.2	- 187.2
	长武覆膜玉米田	15.93	1 242.6	540.6	- 33.6
	长武露地玉米田	18.29	1 426.3	724.3	- 217.3
	镇原覆膜玉米田	16.75	1 306.4	604.4	- 97.4
	镇原露地玉米田	16.31	1 272.4	570.4	- 63.4
	宜君露地玉米田	19.85	1 548.6	846.6	- 339.6
	镇原油菜复种大豆田	15.06	1 174.9	472.9	34.1
	镇原小麦复种糜子田	15.22	1 187.3	485.3	21.7
	各类粮田平均	16.23	1 265.9	563.9	56.9
	长武休闲裸地	21.69	1 692.1	990.1	- 483.1
	荒草地	16.38	1 277.3	575.3	- 68.3
	凋萎湿度	9.00	702.0	—	—
土壤稳定湿度	15.50	1 209.0	507.0	—	
中部半干旱区	定西中产春小麦田	13.56	1 057.8	667.8	- 121.8
	定西低产春小麦田	14.35	1 119.4	729.4	- 183.4
	固原覆膜冬小麦田	11.42	891.0	501.0	45.0
	固原露地冬小麦田	11.50	896.6	506.6	39.4
	定西梯田豌豆田	10.53	821.2	431.2	114.8
	定西梯田马铃薯田	15.38	1 199.8	809.8	- 263.8
	定西马铃薯田	18.63	1 453.1	1 063.1	- 517.1
	固原高产马铃薯田	10.39	810.8	420.8	125.2
	固原低产马铃薯田	12.54	978.3	588.3	- 42.3
	固原糜子田	11.93	930.4	540.4	5.6
	安塞糜子田	16.53	1 289.6	899.6	- 353.6
	安塞谷子田	13.04	1 016.8	626.8	- 80.8
	固原覆膜玉米田	11.12	867.6	477.6	68.4
	安塞玉米田	16.72	1 304.3	914.3	- 368.3
	各类粮田平均	13.41	1 046.0	656.0	- 110.0
	荒草地	11.45	893.0	503.0	- 43.0
	凋萎湿度	5.0	390.0	—	—
土壤稳定湿度	12.0	936.0	546.0	—	
北部半干旱偏旱区	海原高产春小麦田	8.76	683.5	332.5	155.0
	海原低产春小麦田	9.37	731.1	380.1	107.4
	海原中产马铃薯田	9.13	712.2	361.2	126.3
	海原低产马铃薯田	9.84	767.6	416.6	70.9
	海原糜子田	9.07	707.4	356.4	131.1
	各类粮田平均	9.23	719.9	368.9	118.6
	荒草地	7.10	553.7	202.7	284.8
	凋萎湿度	4.50	351.0	—	—
土壤稳定湿度	10.75	838.5	487.5	—	

2.2 土壤湿度剖面分布

2.2.1 南部半湿润区

在长武旱塬地,不同产量水平麦田、休闲裸地与荒草地 0~600 cm 土层土壤湿度剖面分布显示 [图 1(a)],各类麦田土壤湿度明显低于休闲裸地,高产麦田 40~600 cm 土层、中产麦田 80~320 cm 土层、低产麦田 80~300 cm 土层土壤湿度均低于荒草地土壤湿度和土壤凋萎湿度值 15.50%,表明各类麦田均形成了明显的土壤干层,且随着产量水平提高,麦田耗水量增加,土壤湿度趋于降低,干层厚度趋于加深和加厚,中产和低产麦田干层分布深度达到 320 cm 和 300 cm,而高产麦田则超过了 600 cm。在镇原和宜君旱塬地 [图 1(b)],镇原高产麦田 80~600 cm、镇原低产麦田 100~380 cm、宜君低产麦田 60~200 cm 土层土壤湿度均低于荒草地土壤湿度和土壤凋萎湿度值,也形成了明显的土壤干层,只是宜君旱塬麦田土壤湿度明显高于镇原和长武旱塬,土壤干层厚度较薄。

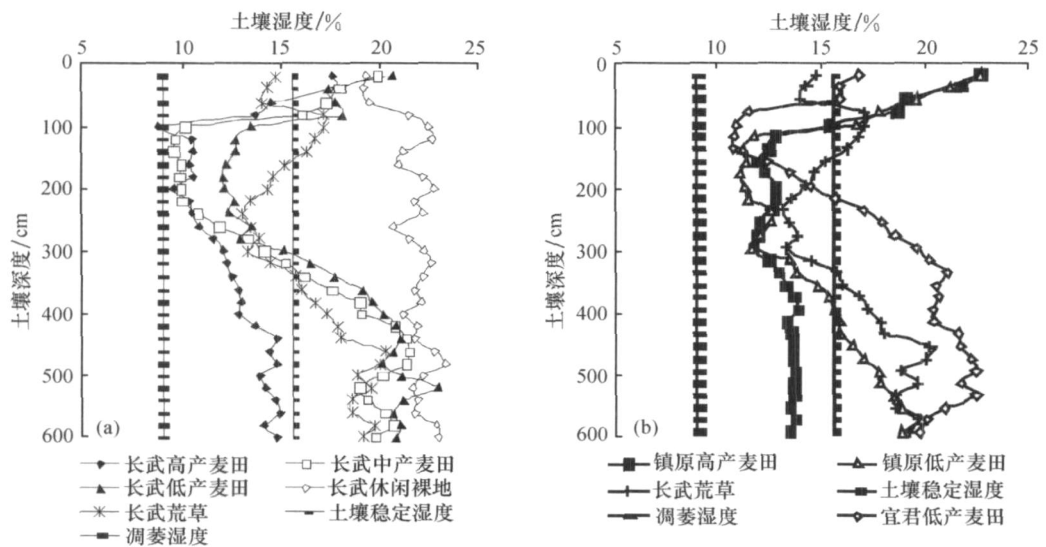


图 1 长武旱塬 (a)和南部旱塬 (b)不同产量水平麦田土壤湿度比较

Fig. 1 Comparison of soil moisture on different wheat stubble fields of Changwu highland (a) and south highland (b)

在渭北旱塬地,长武覆膜玉米田 0~120 cm、宜君露地玉米田 0~100 cm 土层土壤湿度低于土壤稳定湿度值,长武覆膜玉米田 120 cm 以下、宜君露地玉米田 100 cm 以下和长武露地玉米田剖面土壤湿度均高于土壤稳定湿度值 [图 2(a)],表明旱塬地玉米田在 0~120 cm 土层形成了较浅的土壤干层,且宜君露地玉米田土壤湿度明显高于长武塬地。在陇东旱塬地,镇原覆膜玉米田 160~400 cm、露地玉米田 40~260 cm、油菜复种大豆田 140~460 cm 和小麦复种糜子田 40~400 cm 土层土壤湿度低于土壤稳定湿度值 [图 2(b)],均已形成了明显的土壤干层,而且二熟复种秋粮田土壤湿度明显低于一熟玉米田,土壤干层分布深度和厚度也高于一熟玉米田。

2.2.2 中部半干旱区

在定西夏粮田 [图 3(a)],中产春小麦田 60~120 cm 和 220~280 cm、低产春小麦田 80~120 cm 和梯田豌豆田 280~580 cm 土层土壤湿度均低于土壤稳定湿度值 12.00%,

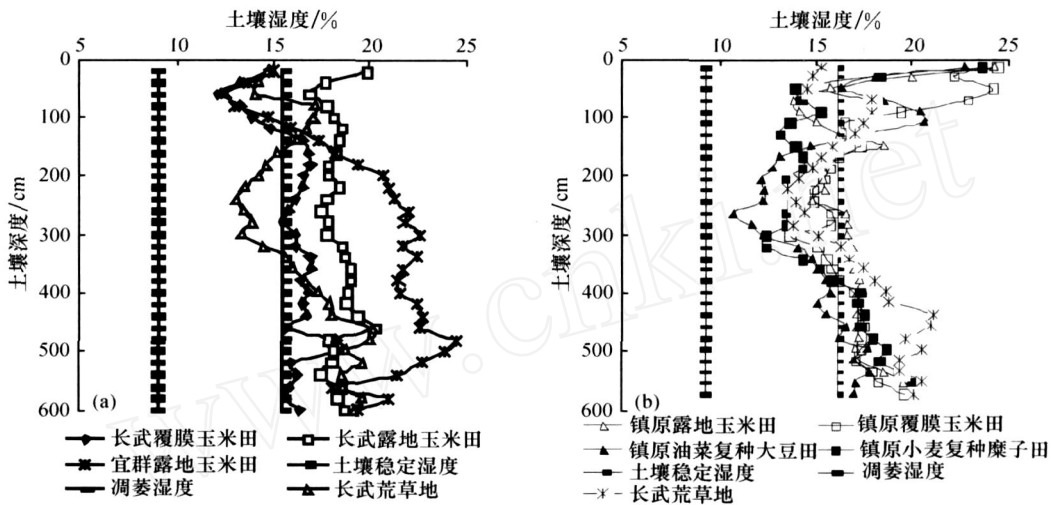


图 2 渭北旱塬不同类型玉米田土壤湿度比较 (a)及陇东旱塬不同产量水平秋粮田土壤湿度比较 (b)

Fig. 2 Comparison of soil moisture on different corn fields of Weibei highland (a) and on different autumn grain crop fields of Longdong highland (b)

麦田土壤干层厚度较薄,而豌豆田土壤干层十分深厚,也许其前茬作物中有耗水强烈的苜蓿。除豌豆田 260 cm 以下土层外,粮田土壤湿度明显高于荒草地土壤湿度。在固原夏粮田 [图 3(b)],覆膜冬小麦田 80~500 cm、露地冬小麦田 60~360 cm 土层土壤湿度均低于土壤稳定湿度值,形成了明显而深厚的土壤干层,在 60~320 cm 土层内,覆膜麦田土壤湿度高于露地麦田,而在 320 cm 以下土层露地麦田高于覆膜麦田,表明覆膜能够促进麦田深层土壤水分的利用。在 20~400 cm 土层麦田土壤湿度高于荒草地,而在 400 cm 以下土层麦田土壤湿度低于荒草地。

在中部半干旱区,定西梯田马铃薯田 120~160 cm、固原高产马铃薯田 20~80 cm 和 160~600 cm、低产马铃薯田 40~300 cm 土层土壤湿度低于土壤稳定湿度值,而定西川旱地马铃薯田剖面土壤湿度均高于土壤稳定湿度值 [图 4(a)]。固原高产马铃薯田土壤干层分布深度超过了 600 cm,在 280 cm 以下土层土壤湿度低于荒草地,说明高产马铃薯田耗水强度和深度均超过了荒草地。固原马铃薯田土壤湿度明显低于定西。固原糜子田 20~300 cm、固原覆膜玉米田 200~600 cm、安塞谷子田 340~600 cm 土层土壤湿度均低于土壤稳定湿度值,有较为深厚的土壤干层 [图 4(b)],而安塞糜子田和玉米田土壤湿度均高于土壤稳定湿度值,没有发生土壤干燥化现象。此外,固原秋粮田土壤湿度明显低于安塞。

2.2.3 北部半干旱偏旱区

在半干旱偏旱区海原,高产春小麦田 60~540 cm、低产春小麦田 120~600 cm、中产马铃薯田 60~520 cm、低产马铃薯田 180~600 cm、糜子田 160~600 cm 土层土壤湿度均低于土壤稳定湿度值 10.75%,形成了十分明显而深厚的土壤干层(图 5),土壤干层分布深度接近或者超过 600 cm。各类粮田土壤湿度剖面分布特征比较接近,在 0~400 cm 土层土壤湿度高于荒草地,400 cm 以下土层低于荒草地。

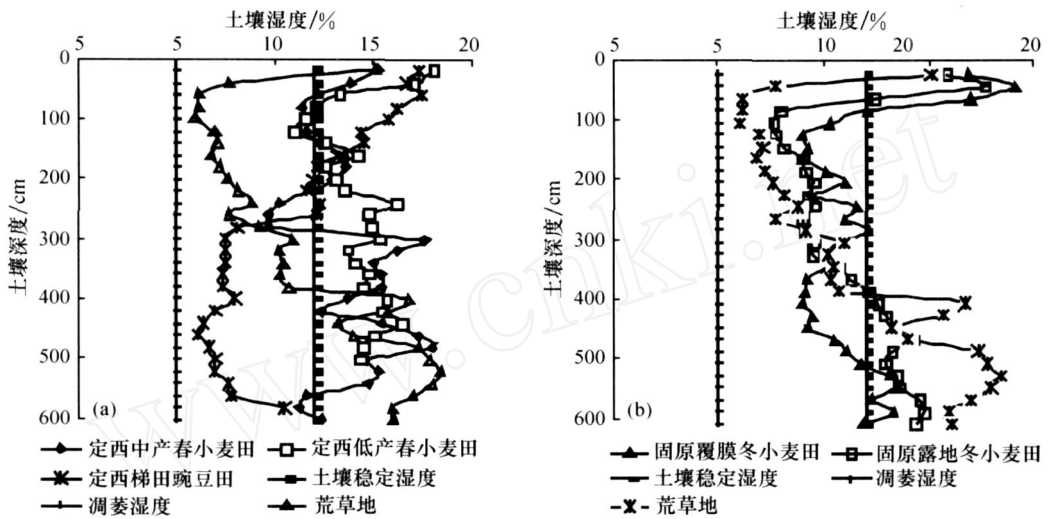


图3 中部半旱区定西(a)及固原不同类型(b)夏粮田土壤湿度比较

Fig. 3 Comparison of soil moisture on summer grain crop stubble fields at Dingxi (a) and on different summer grain crop stubble fields at Guyuan (b) of middle semi-arid area

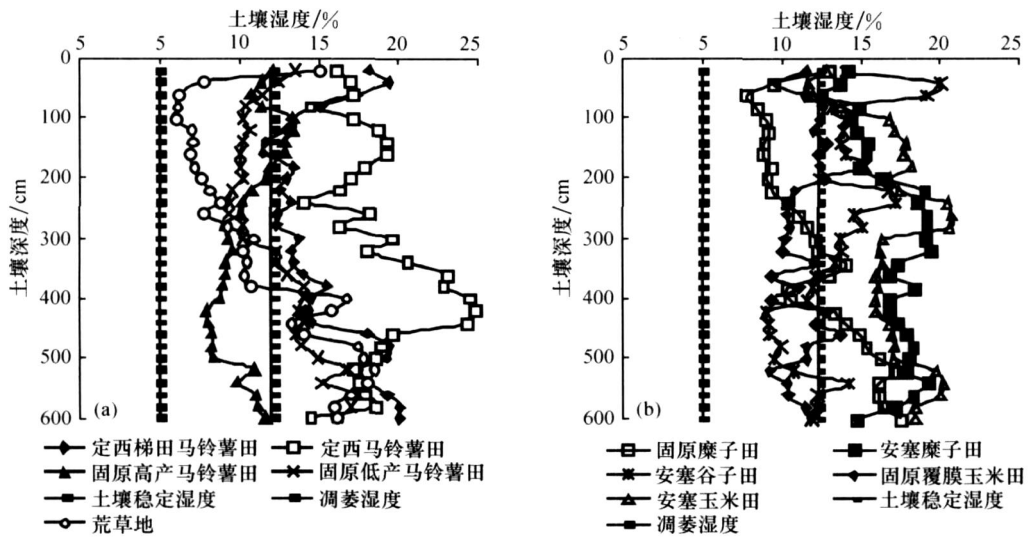


图4 中部半干旱区马铃薯田土壤湿度比较(a)及不同类型秋粮田土壤湿度比较(b)

Fig. 4 Comparison of soil moisture on potato fields (a) and on different autumn grain crop fields (b) of middle semi-arid area

2.3 土壤干燥化强度

2.3.1 南部半湿润区

南部旱地 6类麦田 0~600 cm 土层平均土壤干燥化指数介于 60%~137%, 平均值 102%, 长武高产麦田为中度干燥化强度, 镇原高产麦田和低产麦田均为轻度干燥化强度, 其它麦田为无干燥化强度(表 2)。长武高产麦田严重、中度和轻度以上土壤干燥层厚度分别达到 220、360和超过 560 cm。镇原高产麦田和低产麦田中度以上干燥层厚度分别超过 500 cm

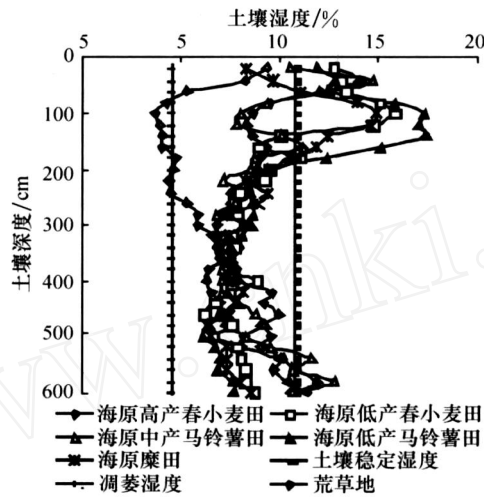


图 5 北部半干旱偏旱区不同类型粮田土壤湿度比较

Fig. 5 Comparison of soil moisture on different grain crop fields of north semi-arid prone drought area

和达到 240 cm,轻度以上土壤干燥层厚度分别超过 520 cm 和达到 280 cm。其它麦田土壤干燥化强度较轻,土壤干层厚度介于 220~240 cm。

南部旱塬 7类秋粮田 0~600 cm 土层平均土壤干燥化指数介于 93%~147%,平均值 120%,除镇原二熟复种大豆和糜子田为轻度干燥化强度外,其它秋粮田均为无干燥化强度。二熟复种田中度和轻度以上土壤干燥层厚度分别达到 180~320 cm 和 320~360 cm,其它各类玉米田土壤干层厚度 0~200 cm。

南部旱塬地各类粮田干燥化指数和土壤干层厚度平均值稍高于荒草地,说明旱作粮田平均土壤耗水强度和深度稍高于或相当于荒草地。夏粮田中度和轻度以上土壤干层厚度平均值分别为 270 cm 和 343 cm,而秋粮田为 94 cm 和 183 cm,夏粮田分别高出秋粮田 176 cm 和 160 cm,表明旱塬地夏粮田土壤耗水强度和深度均高于秋粮田。

2.3.2 中部半干旱区

在中部半干旱区,5类夏粮田 0~600 cm 土层土壤干燥化指数介于 79%~134%,平均值 104%,定西中、低产麦田均为无干燥化强度,而固原覆膜麦田和露地麦田、定西豌豆田均为轻度干燥化强度(表 2)。干燥化夏粮田中度和轻度以上土壤干层厚度平均值分别达到 260 cm 和 360 cm。9类秋粮田土壤干燥化指数介于 77%~195%,平均值 132%,固原高产马铃薯田、糜子田和覆膜玉米田为轻度干燥化强度,其它 6类秋粮田均为无干燥化强度。干燥化秋粮田中度和轻度以上干层厚度平均值分别达到 213 cm 和 333 cm。夏粮田中度和轻度以上土壤干层厚度平均值分别达到 164 cm 和 260 cm,而秋粮田为 96 cm 和 171 cm,夏粮田耗水深度和强度均高于秋粮田。此外,14类粮田土壤干燥化强度和土壤干层厚度均明显小于荒草地,表明半干旱区旱作粮田土壤耗水强度和深度均低于荒草地。

2.3.3 北部半干旱偏旱区

海原 5类旱作粮田 0~600 cm 土层平均土壤干燥化系数为 68%~85%,平均值 76%,高产春小麦田、中产马铃薯田和糜子田均为中度干燥化强度,低产春小麦田和低产马铃薯田为轻度干燥化。5类粮田严重、中度和轻度以上土壤干燥化土层厚度平均值分别为 172 cm、400 cm 和 472 cm。粮田土壤干层厚度小于荒草地。

表 2 黄土高原不同类型旱区旱作粮田和荒草地土壤干燥化强度及其剖面土壤干层厚度 (cm)

Table 2 Soil desiccation intensity and thickness of desiccated soil layers on grain croplands and natural grassland of different rainfall areas on the loess plateau

旱作农业区	粮田类型	平均土壤干燥化指数 $SDI/\%$	土壤干燥化强度	强烈以上干燥层厚度	严重以上干燥层厚度	中度以上干燥层厚度	土壤干层厚度
南部半湿润区	长武高产麦田	60	中度干燥化	40	220	360	>56
	长武中产麦田	108	无干燥化	140	160	200	240
	长武低产麦田	127	无干燥化	0	60	200	220
	镇原高产麦田	78	轻度干燥化	0	60	>500	>520
	镇原低产麦田	99	轻度干燥化	0	160	240	280
	宜君低产麦田	137	无干燥化	0	80	120	240
	长武覆膜玉米田	107	无干燥化	0	20	60	120
	长武露地玉米田	143	无干燥化	0	0	0	0
	镇原覆膜玉米田	119	无干燥化	0	0	20	200
	镇原露地玉米田	113	无干燥化	0	0	20	180
	宜君露地玉米田	167	无干燥化	0	0	60	100
	镇原油菜复种大豆田	93	轻度干燥化	20	120	180	320
	镇原小麦复种糜子田	96	轻度干燥化	0	40	320	360
	各类粮田平均	117	无干燥化	15	71	175	257
	荒草地	113	无干燥化	0	0	100	240
中部半干旱区	定西中产春小麦田	122	无干燥化	0	0	40	180
	定西低产春小麦田	134	无干燥化	0	0	0	40
	固原覆膜冬小麦田	92	轻度干燥化	0	0	220	420
	固原露地冬小麦田	93	轻度干燥化	0	80	260	300
	定西梯田豌豆田	79	轻度干燥化	40	300	300	>360
	定西梯田马铃薯田	148	无干燥化	0	0	0	40
	定西马铃薯田	195	无干燥化	0	0	0	0
	固原高产马铃薯田	77	轻度干燥化	0	100	300	>500
	固原低产马铃薯田	108	无干燥化	0	0	120	260
	固原糜子田	99	轻度干燥化	0	20	200	280
	安塞糜子田	195	无干燥化	0	0	0	0
	安塞谷子田	115	无干燥化	0	0	100	>220
	固原覆膜玉米田	87	轻度干燥化	0	0	140	>220
	安塞玉米田	167	无干燥化	0	0	0	20
	各类粮田平均	120	无干燥化	3	36	120	203
荒草地	92	轻度干燥化	60	240	300	360	
北部半干旱偏旱区	海原高产春小麦田	68	中度干燥化	0	180	420	>500
	海原低产春小麦田	78	轻度干燥化	0	140	>400	>460
	海原中产马铃薯田	74	中度干燥化	0	140	360	>500
	海原低产马铃薯田	85	轻度干燥化	0	220	>400	>420
	海原糜子田	73	中度干燥化	0	180	>420	>480
	各类粮田平均	76	轻度干燥化	0	172	400	472
荒草地	42	严重干燥化	260	320	380	560	

2.3.4 不同类型旱区比较

3个类型旱区比较,南部半湿润区、中部半干旱区和北部半干旱偏旱区各类粮田平均土壤干燥化指数分别为 117%、120%和 76%,分别达到无干燥化、无干燥化和轻度干燥化强度,半干旱偏旱区粮田土壤干燥化程度最严重。在粮田土壤湿度测定深度 0~600 cm 范围内,32类粮田土壤干层厚度平均值为 267 cm,三个类型旱区平均值依次为 257、203和 472 cm,半干旱偏旱区粮田土壤干层厚度最大。

3 结论

(1) 在黄土高原 3个类型旱区,小麦、玉米、马铃薯、糜子、谷子、大豆和豌豆等 32类旱作粮田 0~600 cm 土层土壤湿度为 13.90%,土壤贮水量 1 084.4 mm,土壤有效贮水量 573.7 mm。以土壤水分过耗量判断,有 16类粮田发生了土壤干燥化现象,分别占半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区测定粮田总数的 38.5%、42.9%和 100%。16类干燥化粮田土壤水分过耗量 85.1 mm,其中半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区依次为 74.6、66.4和 118.1 mm。

(2) 在黄土高原 3个类型旱区,以当地土壤稳定湿度值判断,有 28类旱作粮田 100~400 cm 土层属于土壤干层。半湿润区 6类旱塬麦田和 6类秋粮田土壤干层分布于 80~400 cm和 60~260 cm 土层,最大耗水深度超过 600 cm和达到 400 cm。半干旱区 5类夏粮田和 6类秋粮田土壤干层分布于 100~380 cm和 120~440 cm 土层,最大耗水深度分别达到 580 cm和超过 600 cm。半干旱偏旱区 5类粮田土壤干层分布于 120~580 cm 土层,最大耗水深度超过 600 cm。

(3) 在黄土高原 3个类型旱区,32类旱作粮田土壤干燥化指数为 110%,即平均为无干燥化强度,但 16类干燥化粮田土壤干燥化指数为 83%,为轻度干燥化强度。半干旱偏旱区粮田平均土壤干燥化指数 76%,土壤干燥化程度最严重。32类旱作粮田中度和轻度以上土壤干层厚度分别为 186 cm和 267 cm,其中以半干旱偏旱区最高,分别达到 400 cm和 472 cm。

参考文献 (References):

- [1] 信乃诠,王立祥. 中国北方旱区农业 [M]. 南京:江苏科学技术出版社,1998. [XN Nai-quan, WANG Li-xiang Dryland Agriculture in North China Nanjing: Nanjing Science and Technology Press, 1998.]
- [2] 信乃诠,张燕卿,王立祥. 中国北方旱区农业研究 [M]. 北京:中国农业出版社,2002. [XN Nai-quan, ZHANG Yan-qing, WANG Li-xiang Research on Dryland Agriculture in North China Beijing: China Agricultural Press, 2002.]
- [3] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京:科学出版社,2000. [YANG Wen-zhi, SHAO Ming-an Soil Water Research on the Loess Plateau Beijing: Science Press, 2000.]
- [4] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化 [J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356. [LI Yu-shan Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of soil on dryland Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 353-356.]
- [5] 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 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54. [HUANG Ming-bin, DANG Ting-hui, LI Yu-shan Effect of advanced productivity in dryland farming of the loess plateau on soil water cycle Transaction of the CSAE, 2002, 18(6): 50-54.]
- [6] 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 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-65. [FAN Jun, HAO Ming-de, SHAO Ming-an Deep soil water consumption and water eco-environment on dryland agro-ecosystem of the Loess Plateau Transaction of the CSAE, 2004, 20(1): 61-65.]
- [7] 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 [J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3):

- 113-116 [HUANG Ming-bin, YANG Xin-min, LI Yu-shan Hydro-ecological effect of the soil dry layer as affected by bio-ta use in the Loess Plateau *Chinese Journal of EcoAgriculture*, 2003, 11 (3): 113-116.]
- [8] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分利用动态的模拟研究 [J]. 自然资源学报, 2004, 19 (6): 738-746. [LI Jun, SHAO Ming-an, ZHANG Xing-chang Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamic on rainfed highland of the Loess Plateau *Journal of Natural Resources*, 2004, 19 (6): 738-746.]
- [9] 李军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱塬区高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, (2): 54-58. [LI Jun, SHAO Ming-an, ZHANG Xing-chang, et al Simulation of soil desiccation and yield fluctuation of high yield maize field on rainfed highland of the Loess Plateau. *Chinese Journal of EcoAgriculture*, 2007, (2): 54-58.]
- [10] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应 [J]. 生态学报, 2007, 27 (1): 75-89. [LI Jun, CHEN Bing, LI Xiao-fang, et al Effects of deep soil desiccation on alfalfa grassland in different rainfall areas of the Loess Plateau of China *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (1): 75-89.]

Characteristics of Deep Soil Desiccation on Rainfed Grain Croplands in Different Rainfall Areas of the Loess Plateau of China

LI Jun^{1,2}, JIANG Bin³, HU Wei¹, CREN Yang-jin¹,
ZHAO Yu-juan³, LI Xiao-fang¹, CHEN Bing¹

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100, China;

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

Abstract: With rainfall decreasing trendily and grain yield increasing continuously, soil desiccation occurs gradually on grain croplands of the Loess Plateau. Based on extensive deep soil moisture observations of 32 kinds of rainfed grain croplands on semi-humid area, semi-arid area and semi-arid drought prone area of the Loess Plateau, the soil water amounts, soil moisture distributions and soil desiccation intensities on the grain croplands were analyzed and compared. The results are showed as following: 1) Average soil moistures, total soil water amounts and total available soil water amounts in 0-600 cm soil layers of grain croplands were 13.90%, 1084.4mm and 573.7mm respectively; soil desiccations occurred on the 16 grain croplands and an average soil water overuse amount was 85.1mm. 2) The 100 - 400 cm soil layers on the 28 grain croplands were desiccated soil layers, soil moisture of summer grain croplands was lower than autumn grain croplands and maximum soil water use depth of grain croplands was close to or over 600cm. 3) Average soil desiccation index of the 32 grain croplands and the 16 desiccated grain croplands was 110% and 83%, respectively; soil desiccation intensity belonged to non-desiccation and slight desiccation intensity accordingly, and average thickness of desiccated soil layers on the 32 grain croplands was 267cm. Soil desiccation of grain croplands on semi-arid prone drought area was the severest one among three rainfall regions

Key words: the Loess Plateau; grain croplands; soil moisture; soil desiccation