黄土旱塬区农田施肥、产量与土壤深层干燥化的关系研究

薛晓辉[1,2,3]，郝明德[1*]

(1.中国科学院水土保持与生态环境研究中心，陕西 杨凌 712100；
2.中国科学院研究生院，北京 100039；3.毕节学院环境与生命科学系，贵州 毕节 551700)

摘　要：施肥作为稳定作物高产的关键措施之一，同时也会加强对土壤水分的耗损。于2007年小麦播种前测定了长期施肥的试验田0~300 cm土壤剖面水分含量。结果表明，不同施肥处理播前小麦地土壤在1 m深度范围内含水量变化很小，贮水量的极差值为14.7 mm；土壤水分的变化主要集中在100~300 cm土层，贮水量极差值为130.1 mm，且土层深度100~260 cm处出现土壤深层干燥化现象，并随肥料用量增加干燥化程度趋于严重；260 cm以下土壤含水量逐渐上升。氮磷肥配施土壤干层含水量显著高于单施氮肥，单施氮肥显著高于单施磷肥和不施肥，而不施肥和单施磷肥土壤干层含水量差异不显著。从产量角度看，小麦产量与干层水分含量呈线形显著负相关。当产量小于1 354 kg/hm^2，土壤无干层；当产量在1 355~2 406 kg/hm^{2}之间，土壤干层属于轻度干燥化；当产量在2 407~3 458 kg/hm^{2}范围内，土壤干层属于中度干燥化。

关键词：农田；施肥；产量；土壤干燥化；黄土旱塬区

中图分类号：S152.7+1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-7601(2010)06-0075-06

良好的水分和养分条件是保证粮食作物稳产、高产的基本前提。土壤水分影响冬小麦的产量与肥效[1]，水分与养分之间存在明显的耦合效应，肥料的增产作用不仅在肥料自身，还在其与土壤水分的互作[2~5]。为了提高产量，我国自上世纪80年代以来化学肥料大量施用，甚至上世纪末大田生产中已经存在肥料盲目滥用现象[6,7]。而增施肥料加快了作物根系的生长[8,9]，加大了作物对土壤深层储水的利用，易导致土壤深层干燥化。

土壤深层干燥化在旱作农业区是一种特殊水文现象，持续干燥化的后果是形成土壤干层。早在上世纪60年代中期陕西旱塬就发现了干层[10]，干层的形成一是在气候干旱与水势梯度双重作用下，土壤水分强烈蒸发形成。另一种是由于植物根系强烈耗水，土壤水分大量蒸散形成[11]。土壤干层的厚度和深度以土地利用类型不同而异。一般认为旱作高产农田土壤深层潜伏干层[12]，有研究表明[13]土壤的干燥化程度和厚度都表现为林地大于果园，果园大于草地，而农地最小。低产农田的土壤含水量大于中产农田，中产农田大于高产农田[14]。施肥对土壤水分状况也有显著影响，N、P、M单施或配施，土壤剖面含水量比不施肥均有所下降[15]，而且高产高肥势必引起土壤水分含量的下降[16,17]。但以往的研究侧重于土壤含水量分布、贮水量和水分利用效率的研究，对农田土壤干层的干燥化程度涉及较少。旱作区农田生态系统中干层的形成是一个长期的结果，其阻碍了地下水的补给。加强长期施肥情况下农田施肥量、产量和土壤深层的干燥化程度三者的关系研究，对农业发展具有重要的意义。

本文依托中国科学院陕西省长武野外生态试验站的长期肥料试验，研究23年施用不同氮、磷肥后，小麦播前水分在土壤垂直剖面的分布特征，以及不同的产量水平下0~300 cm土层播前水库贮量和土壤深层的干燥化程度。

1　方法与材料

1.1　试验区概况

试验于1984年建立，位于陕西省长武县十里铺村(东经107°40′，北纬35°12′，海拔1 200 m)。该地区为典型的雨养农业区，作物为一年一熟，粮食作物主要有冬小麦(*Triticumaestivum* L.)、春玉米(*Zea mays* L.)、糜子(*Panicummiliaceum* L.)等。属暖温带

收稿日期：2010-03-22
基金项目：国家重点基础研究发展计划(2005CB121101)；中国科学院知识创新方向性项目(kzcx2-yw-424-3)；“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD09B04)；中国科学院农业项目(kzcx1-yw-n15-04)
作者简介：薛晓辉(1980—)，男，陕西蒲城人，在读博士，研究方向为土壤化学与养分循环。E-mail：xuexh8028@sina.com。
*通讯作者：郝明德(1957—)，E-mail：mdhao@ms.iswc.ac.cn。

万方数据

半湿润大陆型季风气候，1984～2006年年均降水571 mm，其中休闲期（7～9月）降水量为年总量的51.7%。2006～2007年生育期降水496 mm，占生育年平均降水的87%，依据降雨年型的划分[1]为干旱年。大于10℃积温3 029℃，年均气温9.1℃，无霜期171 d。黄土堆积深厚，土壤为黄盖黑垆土，质地为中壤，田间持水量一般在23%左右，萎蔫系数在10%左右[13,18]。

1.2 试验设计

该试验共17个处理（表1），设N、P两个因素，每个因素各5个水平〔N：0、45、90、135、180 kg/(hm²·a)；P_2O_5：0、45、90、135、180 kg/(hm²·a)〕，采用不完全随机区组设计，重复3次。肥料于每年小麦播种前撒施，氮肥选用尿素，磷肥选用过磷酸钙。试验小区面积22.2 m²（5.5 m×4 m），每个小区种植小麦15行，每年9月下旬播种180 kg/hm²，小麦品种1984、1985年用"秦麦－4"，1986～1995年用"长武－131"，1996～2007年用"长武－134"。翌年6月中下旬收获，上季小麦收获后至下季播种前为休闲期。

表1 试验小区的肥料用量〔kg/(hm²·a)〕

Table 1 Fertilizer application rates in the experimental plots

处理 Treatment	N	P_2O_5
CK	0	0
P90	0	90
P180	0	180
N45P45	45	45
N45P90	45	90
N45P135	45	135
N90	90	0
N90P45	90	45
N90P90	90	90
N90P135	90	135
N90P180	90	180
N135P45	135	45
N135P90	135	90
N135P135	135	135
N180	180	0
N180P90	180	90
N180P180	180	180

1.3 样品采集、测定与数据统计方法

2007年9月19日，在试验小区采集0～300 cm剖面土壤样品，每20 cm深度取一次土样，以105℃烘干法测定水分含量（重量含水量，文中下同）。小麦产量数据为1985～2004年的平均产量[19]。数据在Microsoft Excel和DPS数据统计软件中处理。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面水分分布特征

冬小麦播种前，不同施肥条件下水分在土壤剖面呈反S状分布（图1）。在0～100 cm深度范围内，土壤水分随深度增加呈增加趋势，最高值出现在80～100 cm土层附近，不同处理间土壤含水量差别不大。这是因为农田刚经过休闲期降水的补充，由于地表没有农作物，在这一深度范围内不同施肥农田的水分含量差异不大。而且由于地表的蒸发作用，导致了上层土壤水分含量较小，下层土壤水分含量较大。土壤剖面从100 cm至260 cm深处，土壤水分含量开始迅速下降至一个相对稳定的水平，土壤干层出现。因为肥料种类和用量不同，干层厚度和平均含水量不同。在不施肥农田（CK）即使有休闲期（6月下旬～9月下旬）降水的补充，土壤干层水分含量仍低于上层，平均值为14.4%，干层厚度较薄；单施磷肥时土壤水分剖面分布特征与不施肥时类似（图1a），土壤干层出现在160～260 cm深度范围内。与不施肥相比，单施氮肥和氮磷肥配施土壤干层厚度较大，出现深度要更接近于地表（图1b，c，d，e），但均在100～120 cm土层以下。260 cm深度以下土壤水分含量开始逐渐升高。

2.2 施肥与土壤深层干燥化

以不同施肥条件下的土壤干层的平均水分含量作为衡量土壤深层的干燥化指标。结果发现，不施肥、单施磷肥的农田土壤干层水分较高，均达到14.0%以上，不施肥与单施磷肥土壤干层水分含量无显著差异（图2）。以不施肥为参照，除单施磷肥外，化肥施用后干层水分含量显著下降（$P<0.05$），最低可以达到10.4%左右，接近萎蔫系数（10.0%）。

从单施氮、单施磷和氮磷肥配施三种施肥方式来看，土壤干层水分含量以单施磷肥最高，单施氮肥次之，氮磷肥配施最低，且三种肥料施用方式造成的干层水分含量差异显著。以不施肥为对照，等量增加N和P_2O_5用量（CK，N45P45，N90P90，N135P135和N180P180处理），随着化肥用量的增加土壤干层水分含量逐渐较少，但是N90P90，N135P135和N180P180处理土壤干层水分含量差异不显著。

2.3 施肥与贮水量

不同氮、磷肥用量下播前农田土壤贮水量不同（表2）。与不施肥相比，不同施肥条件下0～300 cm土层的贮水量差异在－136.5 mm～5.4 mm范围内，极差为141.9 mm。单施磷肥时0～300 cm土层的贮水量变化很小，其差异未达到显著水平。单施氮肥

万方数据

土壤贮水量随氮肥用量的增加而显著减少。与不施肥、单施氮肥或磷肥相比,长期配施氮磷肥会显著降低土壤总贮水量。土壤水分差异主要集中在 100～300 cm 土层,0～100 cm 土层贮水量变化较小,极差为 14.7 mm,变异系数为 2.1%;100～300 cm 土层贮水量较大,极差为 130.1 mm,变异系数为 13.7%。在 0～100 cm 土层水分贮量占整个剖面总贮量的 38.5%～46.7%,而 100～300 cm 土层水分贮量则占总量的 53.3%～61.5%。这是因为采样时期为 9 月份,土壤上层刚经历雨季降水的补充,而 100 cm 土层以下的土壤受降雨补给有限,所以 0～100 cm 土壤贮水量较高。

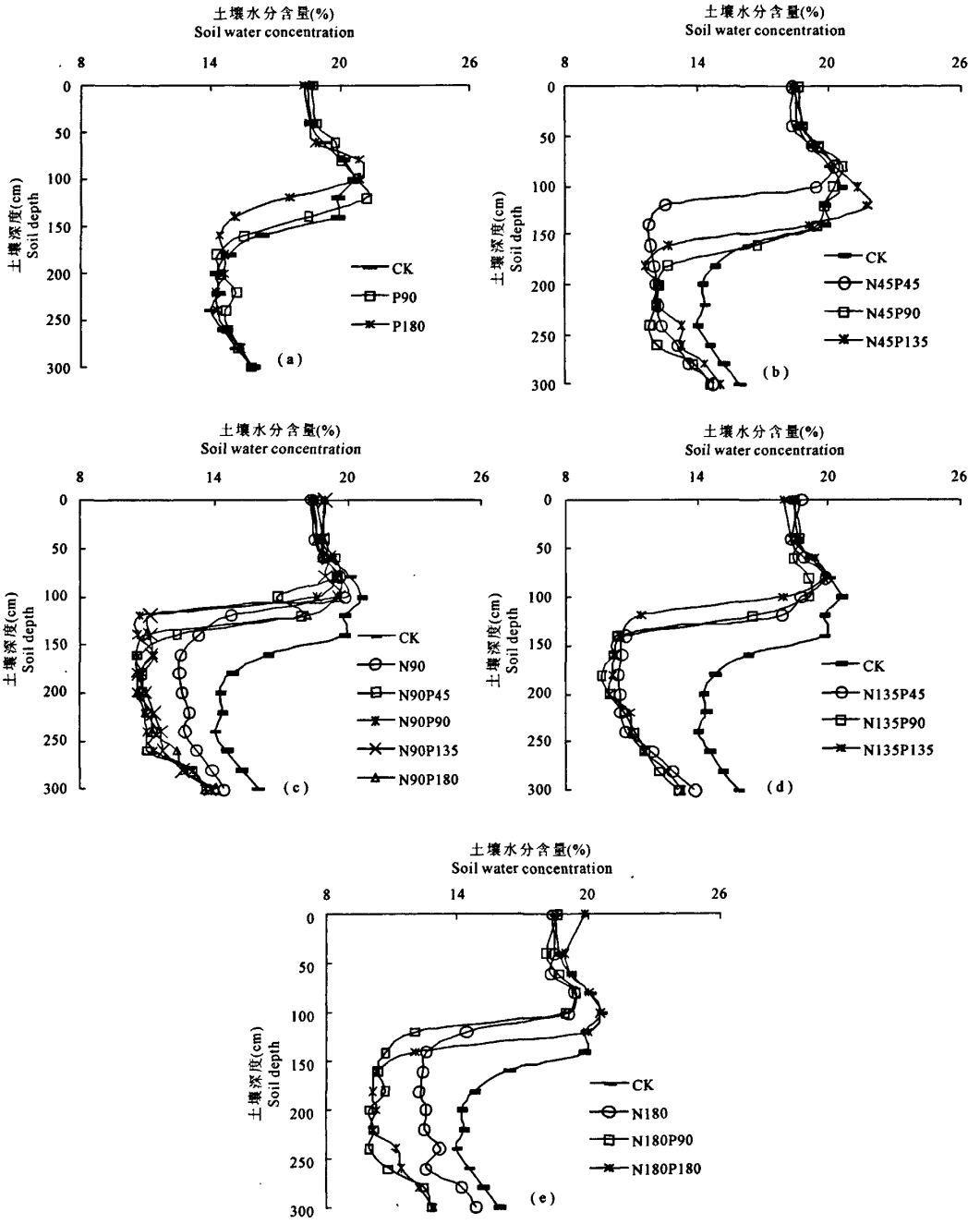

图 1　不同施肥条件下土壤剖面的水分分布特征

Fig.1　The distribution character of water under different fertilization conditions in the vertical soil profiles

万方数据

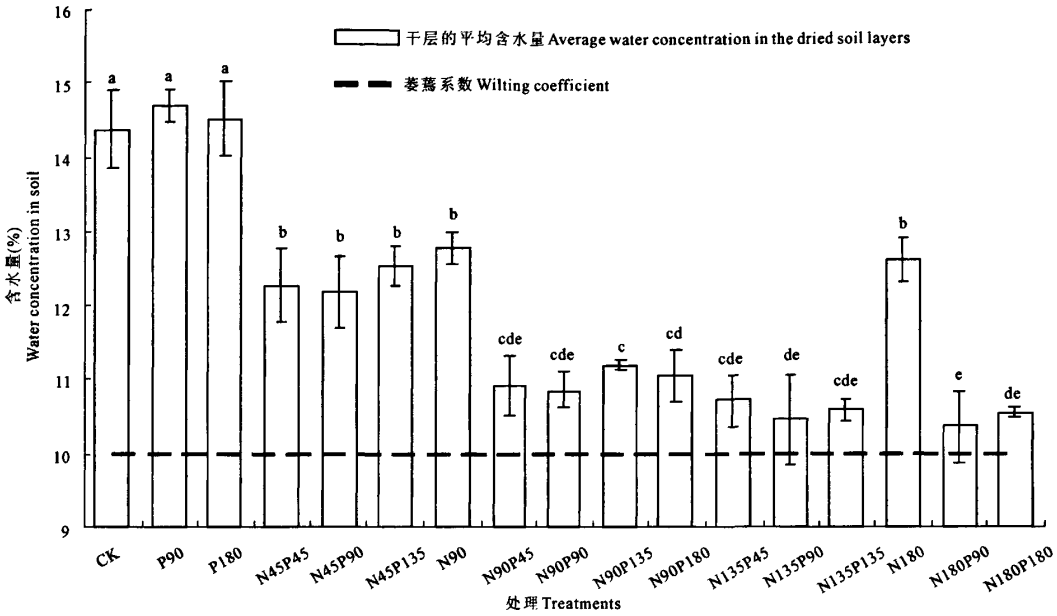

图2 不同施肥下土壤干层的平均含水量变化

Fig.2 The change of water concentration in the dried soil layers under different fertilization conditions

表2 不同施肥条件下土壤贮水量的变化

Table 2 The change of moisture storage with different fertilizer application rates in soil

处理 Treatment	0~100 cm 土层 0~100 cm soil layer			100~300 cm 土层 100~300 cm soil layer			0~300 cm 土层 0~300 cm soil layer	
	贮水量 Moisture storage(mm)	LSD-test ($P<0.05$)	百分比 Percentage (%)	贮水量 Moisture storage(mm)	LSD-test ($P<0.05$)	百分比 Percentage (%)	贮水量 Moisture storage(mm)	LSD-test ($P<0.05$)
CK	259.2	abcd	38.5	414.3	a	61.5	673.5	ab
P90	262.3	a	38.6	416.6	a	61.4	678.9	a
P180	260.7	abc	39.9	393.4	b	60.1	654.1	bc
N45P45	256.0	abcd	43.7	329.4	de	56.3	585.3	def
N45P90	262.0	ab	40.9	378.8	b	59.1	640.7	c
N45P135	263.3	a	41.0	379.2	b	59.0	642.5	c
N90	254.7	abcd	42.4	345.4	c	57.6	600.2	d
N90P45	249.2	d	43.9	318.9	ef	56.1	568.2	fgh
N90P90	251.2	bcd	45.9	295.5	hi	54.1	546.7	hij
N90P135	255.4	abcd	45.5	305.8	fgh	54.5	561.2	ghi
N90P180	256.3	abcd	44.6	318.6	ef	55.4	574.9	efg
N135P45	253.2	abcd	44.8	311.7	fg	55.2	564.8	fgh
N135P90	250.9	cd	45.5	300.0	ghi	54.5	550.9	hij
N135P135	250.3	cd	46.3	289.8	i	53.7	540.1	ij
N180	250.2	cd	42.1	343.6	cd	57.9	593.8	de
N180P90	250.5	cd	46.7	286.5	i	53.3	537.0	j
N180P180	263.9	a	45.7	314.1	efg	54.3	578.0	efg
最大值 Max.(mm)		263.9			416.6		678.9	
最小值 Min.(mm)		249.2			286.5		537.0	
极差 Dif.(mm)		14.7			130.1		141.9	
变异系数 CV(%)		2.1			13.7		8.5	

2.4 施肥量、干燥化与作物产量

施肥的一个重要目的就是为了保证作物的高产,而作物获得高产的同时就必须从土壤中吸收一定水分。从1985~2004年的小麦产量来看(图3),

万方数据

与不施肥相比单施氮肥和氮磷肥配施都能够增加作物产量,而且随着肥料的增加作物产量增加。但是单施磷肥作物产量没有明显变化。

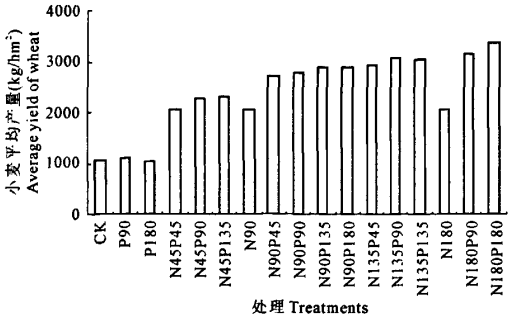

图 3　不同施肥下的 1985 ~ 2004 年平均小麦产量变化

Fig.3　The change of average wheat yield from 1985 to 2004 under different fertilization conditions

高产的获得伴随着较高的肥料施用,也难以避免更多的水分消耗(图 4)。土壤干层的水分含量(Y)与多年平均产量(X)的关系为:$Y = -0.0019X + 16.572$。从产量的角度来看,随着冬小麦产量的增加,土壤干层水分含量呈线形负相关,且达到显著水平(图 4)。

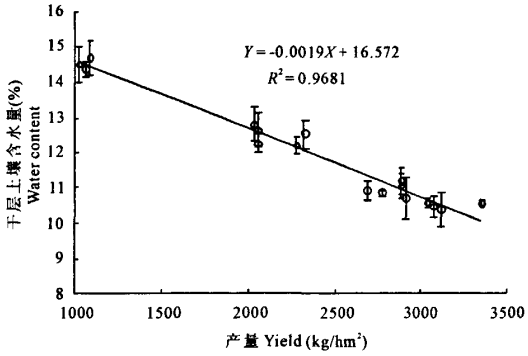

图 4　产量与干层土壤含水量的关系

Fig.4　The relationship between wheat yield and water concentration in the dried soil layer

因为在高产农田施肥量较大,施肥刺激了植物根系和地上部的生长,增加了植物对水分的吸收和蒸腾,旱作地区有限的降水难以补给土壤干层水分的亏缺,长期以往必然在土壤深处形成一个较为干燥的土层。以何福红[13]对王东沟小流域土壤干层的划分为标准,来描述农田土壤干层水分含量与产量的关系。当产量小于 1 354 kg/hm²,干层水分含量 >14.0%,可认为土壤无干层;当产量在 1 355 ~ 2 406 kg/hm² 之间,干层水分含量在 12.0% ~ 14.0%之间,土壤干层属于轻度干燥化;当产量在 2 407 ~ 3 458 kg/hm² 范围内,干层水分含量在 10.0% ~ 12.0%之间,土壤干层属于中度干燥化。

3　讨　论

土壤水库是容纳和转移水分的空间,是地上作物赖以生存的基础。施肥对土壤水库的调节,是通过增强植物的吸收能力来体现的。施用肥料加速了植物的体内水分养分循环,促使根系和地上部的生长以获取更多更深层的水分,加之黄土高原大部分地区的蒸发量是大于降水量的[12],降水长期不能补充土壤深层的水分亏缺,导致了土壤干层的出现。黄土旱塬区播种前农田土壤水分在土壤剖面呈反 S 型分布,土壤干层出现在 100 ~ 260 cm 深度范围内。23 年不施肥的农田干层出现的深度较深且范围小,在 160 ~ 260 cm 深处,干层平均含水量为 14.4%。随着肥料的投入土壤干层厚度向地表方向加大,土壤干层含水量降低,但是单施磷肥除外。与不施肥农田相比,单施磷肥土壤水分分布特征相似,贮水量差异很小,土壤干层平均含水量差异不显著。单施氮肥和氮磷肥配施土壤干层出现深度更浅,个别处理甚至在 100 cm 处出现干燥化,干层最低平均含水量为 10.4%,接近萎蔫系数。这说明施肥加剧了土壤深层干燥化。从单施氮、单施磷和氮磷肥配施三种施肥方式来看,土壤干层水分含量以单施磷肥最高,单施氮肥次之,氮磷肥配施最低,且三种施肥方式造成的干层水分含量差异显著。这主要是因为单施氮肥和单施磷肥造成了土壤的 N/P 比失调,影响作物的生长和对土壤水分的吸收能力。由于休闲期降水对土壤水分的补充,不同氮磷肥施用条件下 0 ~ 100 cm 土壤水分贮水量变化很小,极差值为 14.7 mm。其剖面水分贮量变化主要体现在 100 ~ 300 cm 深度以内,其极差值可达 130.1 mm,这主要是因为不同施肥用量和配比作物对土壤水分的利用能力不一。

干层水分含量的大小,反映了土壤的深层干燥化程度,其与冬小麦产量呈线形显著负相关。产量小于 1354 kg/hm²,土壤无干层(干层水分含量 > 14.0%);当产量在 1 355 ~ 2 406 kg/hm² 之间,土壤干层属于轻度干燥化(干层水分含量在 12.0% ~ 14.0%之间);当产量在 2 407 ~ 3 458 kg/hm² 范围内,土壤干层属于中度干燥化(干层水分含量在 10.0% ~ 12.0%之间)。

4　结　论

黄土旱塬区小麦播前,农田土壤水分在土壤剖

万方数据

面呈反S型分布，土壤干层出现在100～260 cm深度范围内。不同施肥土壤水分贮量的变异主要集中在100～300 cm土层。人为化肥的投入加剧了土壤深层水分的损耗，氮、磷肥配施的农田干层水分含量低于单施氮肥，单施氮肥低于不施肥和单施磷肥，单施磷肥与不施肥土壤干层水分的差异不显著。高额的肥料施用量导致了产量的增加，同时也加剧土壤深层干燥化。而且土壤干层水分含量与冬小麦产量呈线形显著负相关。

参考文献：

[1] 党廷辉，郝明德.黄土塬区不同水分条件下冬小麦氮肥效应与土壤氮素调节[J].中国农业科学，2000，33(4)：62—67.

[2] 上官周平，刘文兆，徐宣斌，等.旱作农田冬小麦水肥耦合增产效应[J].水土保持研究，1999，6(1)：103—106.

[3] 文宏达，刘玉柱，李晓丽，等.水肥耦合与旱地农业持续发展[J].土壤与环境，2002，11(3)：315—318.

[4] 王殿武，周大迈，张建平，等.太行山区旱作农田土壤水分动态及水肥产量效应研究[J].干旱地区农业研究，1998，16(2)：32—40.

[5] 刘文兆，李玉山.渭北旱塬西部作物水肥产量耦合效应研究[J].水土保持研究，2003，10(1)：12—15.

[6] 李世娟，李建民.氮肥损失研究进展[J].农业环境保护，2001，20(5)：377—379.

[7] 同延安，Ove Emteryd，张树兰，等.陕西省氮肥过量施用现状评价[J].中国农业科学，2004，37(8)：1239—1244.

[8] 兰 霞，周殿玺，兰林旺.灌水和施磷对冬小麦根系的影响[J].农业与技术，2005，25(2)：154—156.

[9] 王振华，张喜英，陈素英，等.分层施肥及供水对冬小麦生理特性、根系分布和产量的影响[J].华北农学报，2008，23(6)：176—180.

[10] 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[J].生态学报，1983，3(2)：91—101.

[11] 王 力，邵明安，侯庆春.黄土高原土壤干层初步研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版)，2001，29(4)：34—38.

[12] 王国梁，刘国彬，周生路.黄土高原土壤研究述评[J].水土保持学报，2003，17(6)：156—159.

[13] 何福红，黄明斌，党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J].自然资源学报，2003，18(1)：30—35.

[14] 樊 军，郝明德.旱地长期定位施肥土壤水氮资源利用的研究[J].中国生态农业学报，2003，11(2)：57—60.

[15] 魏孝荣，郝明德，张春霞.旱地长期施肥对土壤水分的影响[J].水土保持研究，2003，10(1)：95—97.

[16] 王 兵，刘文兆，党廷辉，等.黄土塬区旱作农田长期定位施肥对冬小麦水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报，2008，14(5)：829—834.

[17] 胡 伟，李 军，王学春，等.宁南旱地连作春小麦产量动态与土壤干燥化效应模拟研究[J].麦类作物学报，2008，28(2)：295—300.

[18] 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—64.

[19] Hao M D, Fan J, Wang Q J, et al. Wheat grain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the loess Plateau[J]. Pedosphere, 2007, 17(2): 257—264.

Study on the relationship between fertilization, yield and soil desiccation in the Loess Plateau region

XUE Xiao-hui[1,2,3], HAO Ming-de[1]*

(1. *Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*; 3. *Department of Environment and Life Sciences, Bijie College, Bijie, Guizhou* 551700, *China*)

Abstract: Fertilization is a key measure to get high yield in the cropland, and it can increase the consumption of water in the deep soil. The water concentrations were determined under different fertilization conditions in the vertical soil profiles before wheat seeding in 2007. The results showed that the changes of water concentration in the 0～100 cm soil layer were slight on different fertilization conditions, and the range of moisture storage was 14.7 mm. The changes of moisture storage were very great in the 100～300 cm soil layer, and the range of moisture storage was 130.1 mm. The phenomenon of soil desiccation was observed in the 100～260 cm soil layer and the degree of soil desiccation increased with the addition of fertilizer application rates. However, the water concentration in soil rose again below 260 cm depth in the vertical soil profile. The water concentration in the dried soil layer was the highest in plots where N and P_2O_5 were applied together, which was higher than the water concentration in plots where N or P was applied alone. The water concentration was the lowest in the dried soil layer in unfertilizered soil. But, the differences of water concentration were not significant between CK and P treatments in the dried soil layer. In the term of yield, the yield of winter wheat was significantly negative correlated to the water concentration of dried layer as line type. There was no dry layer in deep soil when the yield of winter wheat was less than 1 354 kg/hm^2, and the degree of desiccation in deep soil was slight when the yield of winter wheat was among 1 355 to 2 406 kg/hm^2, and the degree of desiccation in deep soil was moderate when the yield of winter wheat was among 2 407 to 3 458 kg/hm^2.

Keywords: cropland; fertilization; yield; soil desiccation; Loess Plateau region

万方数据