

# 半干旱偏湿润地区旱地小麦土壤水肥耦合的时空变异特征

徐海, 王益权, 刘军

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为农作物精准施肥和管理, 采用定点定位采样、室内分析的方法, 在关中头道塬农田冬小麦生育全过程中, 分层监测 0~100 cm 范围内土壤水分和养分的时空变异过程。结果表明: ① 土壤中水分和各主要养分主要集中在 0~50 cm 的剖面上, 小麦在返青、拔节、灌浆期对水分和养分的需求量教多, 因此, 剖面上水分养分在此阶段发生剧烈变动, 在时间上出现了水分和养分同步变化现象。土壤速效磷前期比较稳定, 返青以后变化幅度较大; 土壤速效钾含量在分蘖期保持较高水平, 抽穗期含量明显降低。② 不同土层的水分和养分的变异性不同。在小麦生育期间表层 0~10 cm 水分含量变异性最大, 很难保证稳定的土壤墒情, 该层对于作物生长属于极度危险层; 其下各层土壤墒情稳定性逐渐增强, 能满足作物生长的要求; 土壤的硝态氮和碱解氮最大变异性也出现在 0~10 cm 范围, 证实作物对速效氮的耗竭和氮素的转化过程主要发生在该土层内, 随土层深度增加, 其变异性减小; 速效磷在 0~30 cm 剖面上变异最大, 速效钾在整个剖面上变异性不显著。土壤水分和养分, 空间上存在着不够协调的问题, 建议应当根据土壤墒情, 在旱塬地区进行肥料深施, 以缓解水分和养分的空间错位矛盾。

**关键词:** 速效养分; 土壤水分; 时空变异; 水肥耦合

**中图分类号:** S152.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-7601(2009)02-0184-05

水分和肥料是农业生产中影响作物生长的两个重要环境因子, 水肥之间的关系相当复杂。而农田土壤水分养分的时空变化特性, 除受成土母质、地形的影响外, 种植作物、耕作、施肥和灌溉等人类活动因素对土壤水分养分的时空变异特性产生着极其深刻的影响<sup>[1~2]</sup>。目前对土壤水分养分变异特性的研究, 主要集中在农作物播种前或作物整个生长周期的某一个和两个生育时期土壤水分养分的空间变异性的研究<sup>[3~15]</sup>, 这对于农作物整个生长周期内连续变化各生长发育阶段精准施肥是不够的。为更好地发挥农作物精准施肥和管理的作用, 根据作物的生长和发育对养分的需求, 在土壤上进行播前速效氮 磷 钾及作物生长期水分养分的时空变异特性研究是非常必要的, 可为作物营养诊断, 变量施肥提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

试区位于西北农林科技大学北校区农作一站, 面积为 200 m×120 m, 全年采用小麦—玉米轮作模式, 属关中平原中部地区, 为暖温带半湿润偏旱气候

区, 海拔 550 m, 光热资源比较丰富, 年均温度 12.9℃, ≥10℃ 积温 4 185℃; 年均降水量 635.1 mm, 夏秋降水集中, 降水量占全年 70%, 年均蒸发量 993.2 mm。本研究从 2006 年 10 月 24 日秋播后开始, 大约每隔 15 天从土壤剖面 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm 处采集土样; 试验小麦品种为小偃 22, 播种前施用尿素 1125.0 kg/hm<sup>2</sup> 作底肥, 生育过程中未进行追肥和灌溉。土壤类型为塿土, 其播前土壤的基本性状详见表 1。

### 1.2 分析项目与测试方法

土壤碱解氮用碱解扩散法; 土壤速效磷测定用 0.5 mol/LNaHCO<sub>3</sub> 浸提—磷钼蓝比色法; 土壤速效钾测定用 1 mol/LNH<sub>4</sub>OAc 浸提—火焰光度法<sup>[16]</sup>。

数据采用 EXCEL 作图后进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 农田土壤水分变化特征

不同作物对水分的需要有显著的差别, 生育期长、叶面积大、根系发达的作物需要水多; 反之则需要水少。就一种作物全生育期来说, 对水分的要求

一般是少—多—少。也就是说从播种到生育盛期以前,主要是营养生长,需水约占生育期的 30%;生长盛期,营养生长与生殖生长并进,需水约占生育期的 50%~60%;开花以后,植株体积不再增大,需水较少,只占全生育期的 10%~20%左右<sup>[17]</sup>。

表 1 供试土壤的主要理化性状

Table 1 Main physical and chemical characters of the tested soil

| 土层深度<br>Depth<br>(cm) | 容重<br>Bulk density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 田间持水量<br>Field capacity<br>(%) | 萎蔫系数<br>Wilting<br>(%) | 有机质含量<br>O·M<br>(g/kg) | 硝态氮<br>Nitr·N<br>(mg/kg) | 碱解氮<br>Avail·N<br>(mg/kg) | 速效磷<br>Avail·P<br>(mg/kg) | 速效钾<br>Avail·K<br>(mg/kg) |
|-----------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0~5                   | 1.24                                       | 21.1                           | 10.9                   | 15.74                  | 28.47                    | 86.51                     | 12.98                     | 141.52                    |
| 5~10                  | 1.24                                       | 21.1                           | 10.9                   | 15.68                  | 28.78                    | 87.16                     | 9.65                      | 143.89                    |
| 10~20                 | 1.25                                       | 27.8                           | 11.8                   | 15.26                  | 16.78                    | 75.96                     | 9.37                      | 125.97                    |
| 20~30                 | 1.26                                       | 28.6                           | 13.0                   | 14.19                  | 14.62                    | 70.94                     | 4.57                      | 103.84                    |
| 30~40                 | 1.25                                       | 26.3                           | 12.3                   | 10.05                  | 18.42                    | 46.76                     | 4.69                      | 95.72                     |
| 40~60                 | 1.30                                       | 26.7                           | 14.4                   | 10.11                  | 12.66                    | 46.28                     | 4.32                      | 86.11                     |
| 60~80                 | 1.29                                       | 27.6                           | 19.0                   | 9.86                   | 9.08                     | 34.28                     | 4.27                      | 86.16                     |
| 80~100                | 1.30                                       | 27.9                           | 18.8                   | 9.62                   | 6.22                     | 38.52                     | 4.43                      | 86.09                     |

表 2 小麦生育期土壤耗水

Table 2 Soil water consupmption in wheat growth period

| 土层<br>Soil layer(cm) | 播前土壤水分贮量<br>Soil moisture content before sowing<br>(mm) | 收获后土壤水分贮量<br>Soil moisture content after harvest<br>(mm) | 土壤耗水量<br>Soil moisture consumption<br>(mm) |
|----------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 0~5                  | 7.91                                                    | 3.80                                                     | 4.12                                       |
| 5~10                 | 8.49                                                    | 4.22                                                     | 4.28                                       |
| 10~20                | 20.29                                                   | 7.22                                                     | 13.06                                      |
| 20~30                | 20.88                                                   | 8.40                                                     | 12.49                                      |
| 30~40                | 20.07                                                   | 10.42                                                    | 9.65                                       |
| 40~60                | 42.67                                                   | 20.89                                                    | 21.78                                      |
| 60~80                | 46.87                                                   | 25.73                                                    | 21.14                                      |
| 80~100               | 45.98                                                   | 27.61                                                    | 18.38                                      |
| Σ                    | 213.17                                                  | 108.28                                                   | 104.89                                     |

从表 2 我们可以看出小麦整个生育期从出苗一直到收获,土壤中的水分一直是处于消耗状态,其中以 0~40 cm 土层中水分的消耗较少,而多数的水分消耗集中在实验层的 40~100 cm 土层中,这不但与小麦自身吸收水分的特性有关,也与土壤水分空间分布有很大的关系,无论是播种前还是收获后,土层中水分含量以 60~100 cm 较为高。

表 3 小麦生育期各土层水分变异情况

Table 3 Soil water variation of different soil layers in the wheat growth period

| 土层<br>Soil layer (cm)                    | 0~5   | 5~10  | 10~20 | 20~30 | 30~40 | 40~60 | 60~80 | 80~100 |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 平均含水量<br>Average moisture<br>content (%) | 11.19 | 12.86 | 13.35 | 13.97 | 13.84 | 13.67 | 14.67 | 15.44  |
| 变异系数<br>Coefficient of variation         | 0.37  | 0.26  | 0.23  | 0.20  | 0.17  | 0.18  | 0.14  | 0.13   |

从表 3 中我们可以看到,在小麦整个生育期期间,土壤含水量呈现由表层到底层递增的趋势,0~20 cm 基本维持在 11%~13%,而 20~100 cm 基本维持在 14%~15%水平;但是水分变异系数却是表层 0~20 cm 远大于底层,这与表层土壤本身的性质有关系,较多、较大的孔隙,以及空气流通,温度等因

素均可以导致水分发生较大的变化,从而导致了较大的变异系数,底层土壤由于受外界因素影响较小,而且理化性质较为稳定,所以变异系数较小。总之土壤水分空间变异特征为表层大,底层较小甚至更为稳定。

2.2 农田土壤速效养分动态变化特征

2.2.1 土壤碱解氮垂直变化特征 碱解氮常常作为土壤总有效氮素供应指标,在土壤肥力诊断等方面具有极为重要的意义。图 1 是旱塬地区小麦生育期间剖面 0~100 cm 范围内土壤碱解氮的动态变化图。从图 1 可以看出土壤碱解氮在 0~40 cm 范围内含量大约在 70~100 mg/kg 范围内,较底层含量高,随土层深度增加其含量逐渐降低,同样的碱解氮也具有表聚现象,不利于作物的吸收;就变异性而言,也是表层变异性最为明显。不同时期不同层次上的碱解氮都有不同程度的消耗,但上层消耗较底层多。

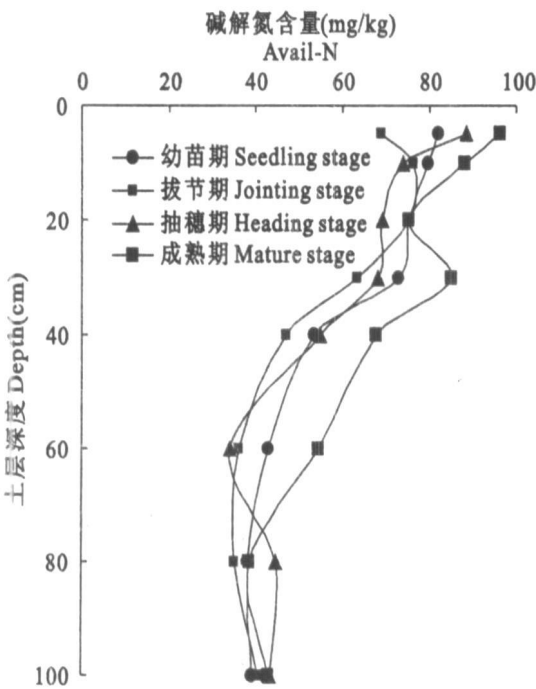


图 1 土壤剖面碱解氮动态

Fig. 1 Dynamic of soil alkali-hydrolyzable nitrogen

2.2.2 土壤速效磷垂直变化特征 磷是植物的第二大重要营养元素,土壤速效磷的含量是其肥力主要指标之一。图 2 是旱塬地区小麦生育期间剖面 0~100 cm 范围内土壤速效磷的动态变化图。从图 2 可以看出土壤剖面上速效磷分布规律,上层较高于下层,速效磷含量在土壤剖面上呈现递减趋势,0~30 cm 土层范围内含量较高,大约在 6~10 mg/kg, 40~100 cm 含量明显低于表层含量,60~100 cm 速

效磷含量在各时期基本上都是最少的。小麦生长主要吸收的是 0~30 cm 土层中的磷素,对磷素营养的需求量不多,因而对各层土壤养分变化影响小,这也是土壤剖面速效磷变异性不大的因素。小麦进入生长后期,根系入土较深,对表层土壤磷素的吸收减少,对耕层以下土壤中的磷素吸收增加,使下层土壤速效磷递减较多;另一方面,磷在土壤中的移动性极小<sup>[18]</sup>。这是耕层土壤速效磷含量始终较高的重要原因。

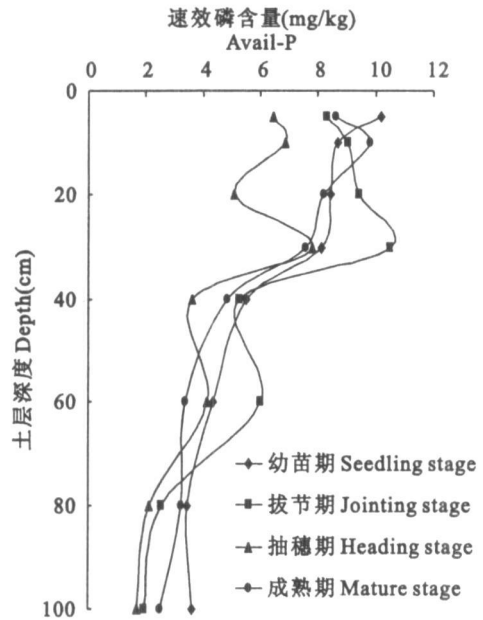


图 2 土壤剖面速效磷动态

Fig. 2 Dynamic of soil available P

2.2.3 土壤速效钾垂直变化特征 随着农业集约化水平提高,黄土母质发育的土壤缺钾的问题也愈来愈普遍,土壤钾素逐渐成为土壤养分管理的重要内容之一。图 3 是旱塬地区小麦生育期间剖面 0~100 cm 范围内土壤速效钾的动态变化图。从图 3 可以看出,土壤速效钾在各个剖面层次上的差异性并不大,剖面上呈现含量递减趋势,以 40 cm 为分界,0~40 cm 内的含量明显大于 40~100 cm 各层速效钾的含量;在小麦生育期中,0~40 cm 内速效钾含量逐渐降低,而 40~100 cm 呈现逐渐增多的趋势。冬小麦吸收钾素的变化与土壤速效钾、缓效钾的动态变化关系密切,二者相互影响。

3 总 结

1) 土壤剖面上的水分,主要养分含量呈现季节性的变化,随小麦生育期而发生一系列变动,土壤水分和各主要养分发生剧烈变动的层次几乎集中在 0~50 cm 剖面上,而养分的含量也主要集中于该区

域,小麦在返青,拔节期,灌浆期几个主要的生理时期对养分水分的吸收量都很大,也是在该时期,剖面上出现了水分,养分含量的剧烈变动,而且几乎同时进行,磷素后期需要量较大,若此时某一养分供应不及时,将导致作物减产。

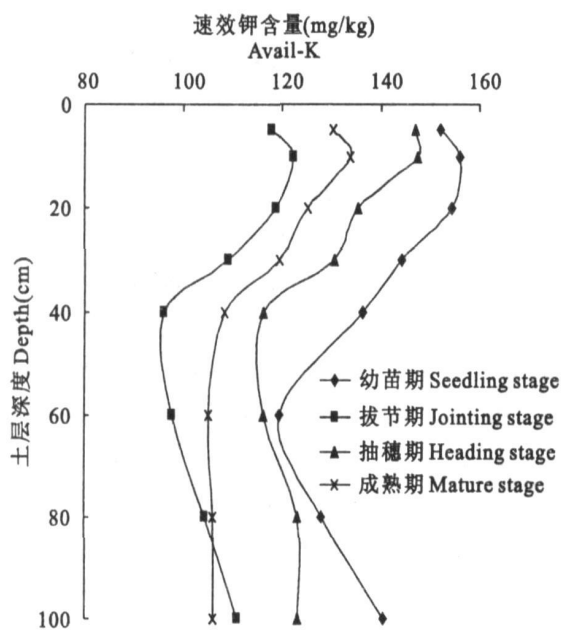


图 3 土壤剖面速效钾动态  
Fig. 3 Dynamic of soil available K

2) 不同层面上的水分和养分变异性不同,从最后的结果处理来看,水分变异性最强出现在 0~10 cm 的表层,而硝态氮和碱解氮也是出现在 0~10 cm 表层,证实作物对速效氮的耗竭和氮素的转化过程主要发生在该土层内,底层变异性逐渐减小,速效磷出现在 0~30 cm,而钾的变异性在整个剖面上不是很明显,水分在整个小麦生育期一直处于消耗状态,而氮、磷、钾素在不同时期还有一定程度的回升,硝态氮和碱解氮还存在不同程度的表聚,其中硝态氮表聚作用最为显著。

3) 温度,微生物活性等均可以影响小麦根系对水分和养分的吸收,微生物本身也可以影响养分在剖面上的分布。

总之,黄土农田水分养分变异有在时间一定程度的同步性,而在空间上却是千差万别,我们要根据土壤本身的理化性质和作物特性,结合土壤水分养分时空变异特征进行合理的田间管理,适时适量的

灌溉施肥,争取最大限度的利用土壤,达到高产丰产的目的,实现农业的可持续发展<sup>[19]</sup>。

参考文献:

[1] 许咏梅,冯耀祖,张小玲.土壤速效养分空间变异研究[J].新疆农业科学,2003,40(2):103-105.

[2] 王宏庭,金继运,王 斌.土壤速效养分空间变异研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(4):349-354.

[3] 王新民,王卫华,侯彦林.豫北蔬菜保护地土壤磷素形态及其空间分布特性研究[J].土壤,2004,36(2):173-176.

[4] 杨玉玲,盛建东,田长彦,等.盐化灌淤土壤速效氮、磷、钾空间变异性与棉花生长发育关系初步研究[J].中国农业科学,2003,36(5):542-547.

[5] 胡克林,李保国,林启美,等.农田土壤养分空间变异性特征[J].农业工程学报,1999,15(3):33-38.

[6] Flavio H Gutierrez-Boem, Grant W Thomas. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans[J]. Plant and Soil, 1999, 207: 87-96.

[7] Groot J J R. Nitrogen turnover in the soil-crop system [M]. Kluser Scadmis Publishers, 1991.

[8] Larsson M. Translocation of nireogen in osmotically stressed wheat seedlings[J]. Plant Cell Environ, 1992, 15: 447-453.

[9] Margesin R, Schinner F. Phophomonoesterase, phosphodisterase, phosphotriesterase and inorganic pyrophosphatase activities in forest soils in an alpine area; effect of pH on enzyme activity and extractability[J]. Biol Fertil Soil, 1994, 18: 320-326.

[10] Brussaard L, Pelletier V MB, Bignell D. Biodiversity and ecosystemfunctioning in soil[J]. Ambio, 1997, 26: 563-557.

[11] Ballard J P. A quantitative analysis of fators affecting plant nutrient uptake from some soil[J]. J soil Sci, 1975, 26: 195-206.

[12] 赵炳梓,徐富安.水肥条件对小麦、玉米 N、P、K 吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(3):260-266.

[13] 赵立新,荆家海.旱地冬小麦施肥效应研究[J].干旱地区农业研究,1991,9(4):46-51.

[14] 兰晓泉.半干旱黄土丘陵区农田水肥效应研究[J].土壤通报,1998,29(4):161-163.

[15] 吕世华,张福锁,刘学军,等.重视土壤、水和肥料资源利用与保护新技术研究促进农业可持续发展[J].西南农业学报,1999,12:26-31.

[16] 史建文,鲍士旦,史瑞和.耗竭条件下层间钾的释放及耗竭后土壤的固钾特性[J].土壤学报,1994,31(1):42-49.

[17] 李春生.浅谈水分对作物生长的影响[EB/OL]. <http://www.i121.net/list.asp?unid=836>, 2007, 9.

[18] 彭克明,裴保义.农业化学[M].北京:中国农业出版社,1980: 123.

[19] 孙雅英.略论知识与农业可持续发展[J].农业经济, 2000, (11): 34-35.

# The spatio variability of soil water-fertilizer coupling in Guanzhong area

XU Hai, WANG Yi-quan, LIU Jun

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

**Abstract:** This trail is designed to monitor the process of the temporal and spatial of soil moisture and nutrients variation during wheat growth period by testing the 0~100 cm soil layer, and has got the main conclusion as: (1) Moisture and nutrients concentrated in the 0~50 cm profile in the soil, a mass of moisture and nutrients are needed during wheat growth stages of regreening, jointing, grain filling, thus, radical change of soil moisture and nutrients on the profile occurred, and the variation of moisture and nutrients happened synchronically. Available phosphorus was stable during early stages, variation amplitude of available phosphorus was a little bigger after regreening, while available potassium content kept a high level during tillering stage and reduced significantly during heading stage. (2) The variation of soil moisture and nutrients was different on different profile. The variation of soil moisture content on the 0~10 cm profile was the most significant, which was hard to assure soil moisture, and this profile was the most dangerous to crop growth; soil moisture was stable on the profile beneath, which could meet the need of crop growth; the max variation of nitrate nitrogen and alkaline nitrogen occurred on 0~10 cm profile, which proved that plant uptake available N and the process of N element transformation occurred on this profile, and the variation got smaller as the depth increased; variation amplitude of available phosphorus had the max on 0~30 cm profile, while variation amplitude of available potassium was not obvious. There was the problem of soil moisture and nutrients spatial inconsistency, we suggested deep application of fertilizer according to soil moisture so as to relive soil moisture and nutrients spatial inconsistency.

**Key words:** available nutrient; soil moisture; spatio-temporal variability; water-fertilizer coupling

(上接第 183 页)

## Application of Van Genuchten model to analysis of soil moisture characteristic curve

WANG Xiao-hua<sup>1</sup>, JIA Ke-li<sup>1</sup>, LIU Jing-hui<sup>2</sup>, LI Li-jun<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China)

**Abstract:** Two useful functions of Matlab software are used, namely, nonlinear curve fitting and nonlinear regression function. The soil moisture characteristic curves under zero tillage and conventional tillage are analyzed. Van Genuchten model is used to model the soil characteristic curves under the conditions of zero tillage and conventional tillage. The results show that the nonlinear regression function has better adaptability. Van Genuchten model can be used in soil moisture analysis under different tillage conditions.

**Key words:** soil moisture characteristic curve; tillage; Van Genuchten model; nonlinear curve fitting; nonlinear regression function