

# 渭北旱塬矮化苹果园滴灌下土壤剖面水分和 养分时空分布特征

王冲<sup>1,2</sup>, 秦亚旭<sup>1,2</sup>, 张珂<sup>1,2</sup>, 孔旭<sup>1,2</sup>, 郑朝霞<sup>1,2</sup>, 冯天宇<sup>1,2</sup>, 翟丙年<sup>1,2,3</sup>

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,  
陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学苹果试验站,陕西 渭南 715600)

**摘要:** 通过采集渭北旱塬矮化果园4个不同时间点(4月2日,5月1日,5月30日,8月13日)的土壤剖面样品,分析滴灌施肥下土壤剖面水分和养分时空分布的特征。结果表明:(1)前期土壤剖面水分集中分布在滴灌点附近,水平迁移距离20 cm,垂直迁移距离100 cm;后期滴灌和降雨增多,导致在60—100 cm深土层出现较高的土壤水分含量,土壤水分在水平方向上有明显的分布差异。(2)土壤硝态氮表现出明显的随水移动规律,且集中分布在水分湿润区边缘附近,垂直迁移距离大于水平距离。(3)土壤速效磷、速效钾在土壤剖面呈现出“表聚现象”,速效磷主要分布在水平方向0—20 cm,垂直方向0—30 cm区域,速效钾主要分布在水平方向0—40 cm,垂直方向0—40 cm;均表现滴灌点区域含量高,远离滴灌点含量相对较低,具有明显的空间分布差异。在水平方向20—40,0—40 cm深土层速效钾含量相对较低,出现较明显的低值区域,后期该区域出现水平方向远离。(4)建议减少灌溉量,水分入渗深度应控制在0—40 cm,从而减少氮素淋溶流失;合理调整滴灌点与树干的距离,保证当年新生根系能吸收到充足氮、磷、钾养分。

**关键词:** 渭北旱塬; 滴灌施肥; 矮化苹果; 土壤剖面; 时空分布

中图分类号:S145.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0343-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.047

## The Spatial and Temporal Distributions of Moisture and Nutrients in Soil Profile of Dwarf Apple Orchards Under Drip Fertigation in Weibei Dry-Land, China

WANG Chong<sup>1,2</sup>, QIN Yaxu<sup>1,2</sup>, ZHANG Ke<sup>1,2</sup>, KONG Xu<sup>1,2</sup>,

ZHENG Zhaoxia<sup>1,2</sup>, FENG Tianyu<sup>1,2</sup>, ZHAI Bingnian<sup>1,2,3</sup>

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment of Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Yangling, Shaanxi 712100; 3.Apple Experiment Station, Northwest A&F University, Weinan, Shaanxi 715600)

**Abstract:** The samples of soil profile at four different times (April 2, May 1, May 30 and August 13) of dwarfed apple orchards under drip fertigation in Weibei dry-land were collected to analyze the characteristics of spatial and temporal distributions of moisture and nutrients in soil profile. The results showed as follows: (1) Soil moisture was concentrated around the drip emitter in the early time. Soil moisture presented an obvious accumulation phenomenon with horizontal movement distance of 20 cm and vertical movement distance of 100 cm. At the later stages, the increased drip irrigation and rainfall resulted in the higher soil moisture in the soil layer of 60—100 cm. A significant difference in the distributions of soil moisture was observed in the horizontal direction. (2) Soil nitrate nitrogen showed an obvious movement with water which distributed concentratedly near the edge of the wetting area and the vertical migration distance was greater than the horizontal migration distance. (3) Surface accumulation of available phosphorus and available potassium were observed on the soil profile. Available phosphorus mainly distributed in 0—20 cm in the horizontal direction and 0—30 cm in the vertical direction. Available potassium distributed mainly in 0—40 cm in the

收稿日期:2020-01-12

资助项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27);公益性行业(农业)科研专项(201303104);陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2015-17);陕西杨凌示范区农业科技示范推广能力提升项目(2015-TS-18);西北农林科技大学试验示范基地科技成果推广中心项目(TGZX2014-16)

第一作者:王冲(1994—),男,硕士研究生,主要从事苹果园水肥一体化技术研究。E-mail:798891260@qq.com

通信作者:翟丙年(1967—),男,博士,教授,主要从事旱地苹果园水肥管理研究。E-mail:zhaibingnian@nwsuaf.edu.cn

horizontal direction and 0–40 cm in the vertical direction. All the results showed that the contents of available phosphorus and available potassium of near drip emitter were higher than those far away from, which showed an obvious spatial distribution difference. In the horizontal direction of 20–40 cm and the depth of 0–40 cm, the contents of available potassium showed a relatively obvious low-value area where appeared far away in horizontal direction later.(4) Therefore, it is recommended that the amount of irrigation should be reduced to control the depth of water infiltration at 0–40 cm and reduce the loss of nitrogen leaching. The distance between the drip emitter and the plant should be adjusted to ensure that the new root system could absorb sufficient nitrogen, phosphorus and potassium nutrients.

**Keywords:** Weibei dry-land; drip fertigation; dwarf apple orchards; soil profile; spatial and temporal distribution

渭北旱塬地区是我国西北黄土高原的组成部分之一,该地区独特的气候和土壤地质条件特别有利于优质苹果的生长,是我国唯一符合优质苹果生产 7 项指标要求的苹果最佳区域<sup>[1]</sup>,也是中国乃至世界的苹果优势产业带<sup>[2]</sup>。但是该地区降水量不足且年度和季节变化大,雨水集中在 7—9 月,占全年降水量的 70%~90%,而且随着果园进入老龄化,加上养分管理方式粗放,水肥耦合效应差等,是渭北旱塬地区优质苹果生产中的亟待解决的问题<sup>[3]</sup>。因而在西北干旱半干旱地区进行滴灌施肥是我国实现 2020 年化肥零增长目标的重要手段之一。

滴灌施肥是指肥料联同灌水直接进入作物根部的过程,是给作物提供定量水分、养分并且保持土壤水分和养分浓度的有效方法<sup>[4-5]</sup>,具有节水、节肥、省工、高产、高效等优势特征<sup>[6-7]</sup>。滴灌施肥可以有效提高苹果树体氮素的利用率,降低了土壤中的氮素残留<sup>[8]</sup>,明显降低苹果园不同氮素形态的迁移、富集和转化作用<sup>[9]</sup>,有效促进矮砧苹果树的生长发育<sup>[10]</sup>,提高产量、改善品质及增加果实养分吸收方面效果显著<sup>[11-12]</sup>。

苹果矮化栽培技术模式是未来苹果栽培发展的方向和趋势,但是矮化果树根系分布浅,对养分含量敏感,前人研究多是对养分含量、果树产量和品质,少对土壤养分空间分布的研究。因此,本研究旨在明确滴灌施肥对矮化苹果园土壤剖面养分的时空特征,以期对滴灌果园土壤养分分布有较完整的认识,并为渭北旱塬地区矮化苹果园滴灌施肥提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2018 年 9 月至 2019 年 9 月在陕西省渭南市白水林皋镇天鑫现代农业园(35.18°N, 109.44°E)内进行。该地区年均降水量 570 mm,年际变化大,冬春季干旱少雨,年平均气温 11.4 °C,年极端最高温 39.4 °C,最低温 -16.7 °C,无霜期 207 天。试验地土壤类型为黄壤土,质地为中壤,其基础肥力为:pH 为 8.02,有机质含

量为 17.07 g/kg、全氮含量为 0.93 g/kg、硝态氮含量为 19.09 mg/kg、铵态氮含量为 0.38 mg/kg、速效磷含量为 15.80 mg/kg、速效钾含量为 320.42 mg/kg。

### 1.2 滴灌施肥方案与实施

供试品种为“瑞雪”,矮化砧木 M26,2015 年春季栽种,2017 年开始结果,株行距为 1.5 m×4 m,树形为自由纺锤形。树干左右各铺设 50 cm 宽黑色地布,在树干两侧 20 cm 处分别铺设 1 条滴灌带,置于在地布之下。具体施肥方案见表 1,每次灌溉通过 3.5 h 完成灌水为 74.96 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。水溶肥由白水四季香农业科技服务有限公司提供,肥料配比即按照施肥方案确定比例。每年 9 月施用羊粪有机肥 89.95 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,并在 11 月进行冬灌 1 次,灌水 89.95 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。其余均为常规田间管理方式。

表 1 施肥方案

施肥时间 (年-月-日)	N/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	灌水量/ (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
2019-03-30	14.990	9.370	5.620	74.96
2019-04-14	14.990	9.370	5.620	74.96
2019-04-28	11.245	14.990	11.245	74.96
2019-05-13	11.245	14.990	11.245	74.96
2019-05-27	11.245	11.245	16.865	74.96
2019-06-18	11.245	11.245	16.865	74.96
2019-07-10	9.370	11.245	18.740	74.96
2019-07-28	9.370	11.245	18.740	74.96
总计	173.150	144.670	149.910	599.68

### 1.3 样品采集与测定

分别于 2019 年的 4 月 2 日(萌芽期:滴灌后 3 天)、5 月 1 日(坐果期:滴灌后 3 天)、5 月 30 日(幼果期:滴灌后 3 天)和 8 月 13 日(膨果期:滴灌后 15 天)采集 0—100 cm 深度土壤样品,采用空间网格土钻法分层进行土样采集,具体方法为:以滴头为坐标原点,沿垂直于树行并远离树干方向,距滴灌点正下方 0,20,40,60,80 cm 处,采集距地表 0—100 cm 土壤样品,每层 20 cm,重复 6 次,具体采集方法见图 1。一部分鲜土测定水分和硝态氮,另一部分土样进行风干,过 1 mm 筛,用于测定速效磷和速效钾。试验时期 2019 年 3 月 26 日至 8 月

15日的降水量见图2。

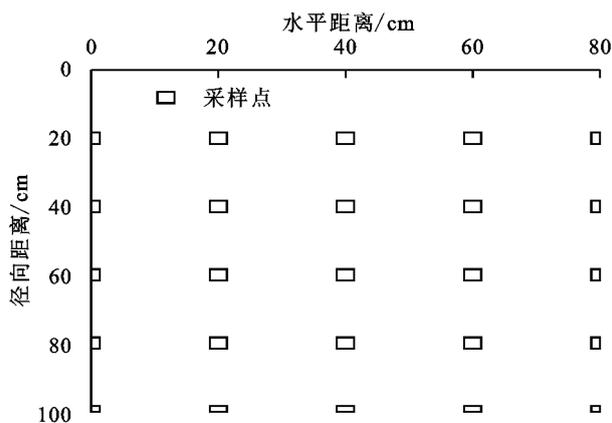


图1 土壤样品采集方法示意

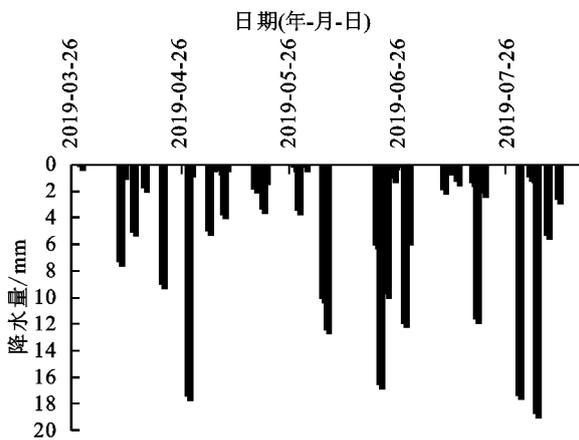
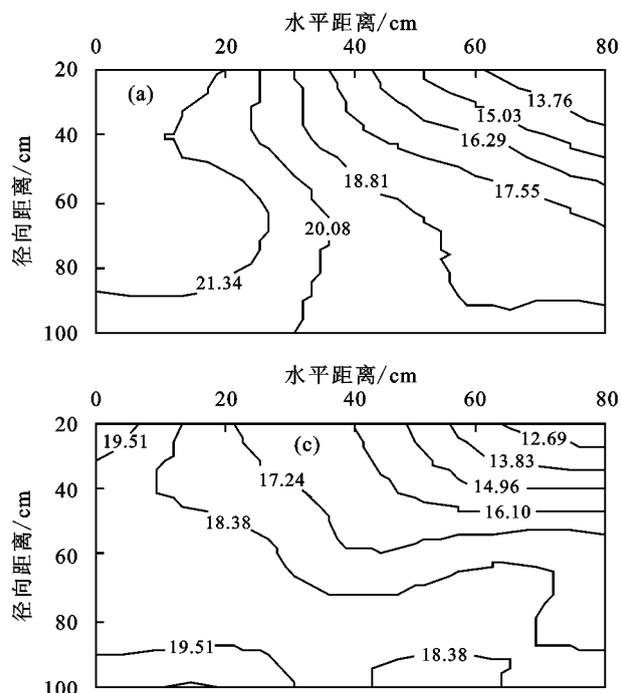


图2 2019年3—8月降水量



土壤含水率用烘干法测定;土壤硝态氮用1 mol/L KCl 浸提,AA3 型连续流动分析仪测定;土壤速效磷用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度计测定<sup>[13]</sup>。

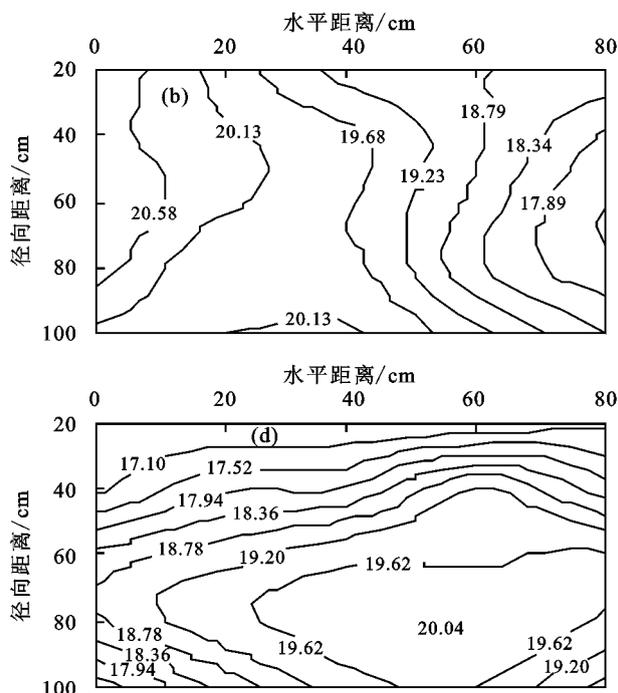
### 1.4 数据处理

运用 Excel 2013 进行数据的整理和汇总,使用 OriginPro 2019b 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 滴灌施肥下土壤水分时空分布特征

由图3可知,0—40 cm 深度水平方向土壤含水率随距离增大逐渐降低,水平方向0—30 cm 位置的垂直方向随土层深度增加,土壤含水率呈现先降低后升高再降低趋势。以水平方向30 cm 处为分界线,在垂直方向,左侧土壤含水率高于20%,右侧含水率低于20%。水平方向不同深度土层土壤含水率随距离的增加而逐渐降低,以滴灌点下方各土层土壤含水率为最高。水平方向表层土壤含水率随距离增大而降低,垂直方向60 cm 以下,含水率均在18%以上。水平方向0—20 cm 位置的垂直方向上随土层深度增加,土壤含水率呈现先降低后升高趋势。表层含水率含量相对较低,在40 cm 土层以下相对较高,并集中分布在水平方向40—70 cm,垂直方向60—90 cm,均在19%以上。随滴灌次数和雨水增多,土壤水分在深层出现明显的富集分布。



注:土壤剖面水分含量单位为%;图a为2019年4月2日采样;图b为2019年5月1日采样;图c为2019年5月30日采样;图d为2019年8月13日采样。下同。

图3 滴灌条件下果园土壤剖面水分空间分布等值线图

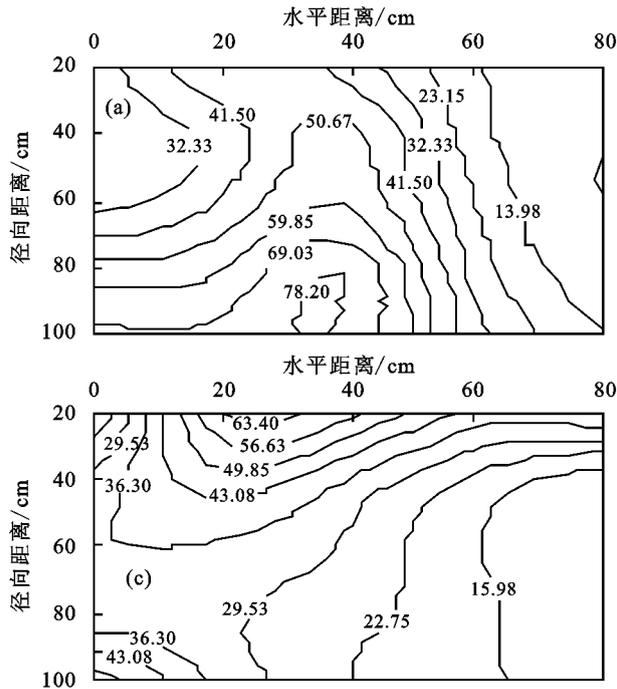
### 2.2 滴灌施肥下土壤硝态氮含量时空分布特征

由图4可知,0—100 cm 土层的在水平方向,硝态氮含量随距离增加呈现先升高后降低趋势,集中分

布在水平方向0—50 cm,垂直方向70—100 cm 范围,为>40 mg/kg。各土层硝态氮含量在水平方向均呈现随距离增加先升高后降低趋势,其中水平方向

0—30 cm,垂直方向 0—50 cm 范围含量最高,为 > 60 mg/kg,水平方向 20—40 cm,垂直方向 60—100 cm 范围含量较高。垂直方向 0—70 cm 土层硝态氮含量在水平方向呈现随距离增加先升高后降低趋势,垂直方向 80—100 cm 土层硝态氮含量在水平方向呈现随距离增加而降低,其中在水平方向 10—50 cm,垂直方向 0—40 cm 范围含量最高,为 > 49.85 mg/

kg。与其他几个时期相比,硝态氮含量明显降低,硝态氮含量在水平方向呈现随距离增加而降低趋势,在垂直方向表现出随距离增加而增加趋势,且集中分布在水平方向 0—30 cm,垂直方向 70—100 cm 范围,为 > 30 mg/kg。4 个时间采样结果均表现出,土壤硝态氮分布在水分湿润区域边缘,呈现出明显的随水移动分布特征。



注:土壤剖面硝态氮含量单位为 mg/kg。

图 4 滴灌条件下果园土壤剖面硝态氮空间分布等值线图

### 2.3 滴灌施肥下对土壤速效磷含量时空分布特征

由图 5 可知,水平方向和垂直方向土壤速效磷含量呈现随距离增加而逐渐降低后趋于稳定,其中速效磷集中分布在水平方向 0—30 cm,垂直方向 0—40 cm,且均在 20.40 mg/kg 以上。水平方向 0—20 cm,垂直方向 0—40 cm 范围速效磷集中分布,均在 20.88 mg/kg,其余地方分布均匀,含量趋于一致。垂直方向 0—40 cm 土层在水平方向,速效磷含量随距离的增加逐渐降低后趋于稳定,在垂直方向上随距离增加迅速降低,集中分布范围在水平方向 0—40 cm,垂直方向 0—40 cm,含量均在 52.75 mg/kg 以上。速效磷表现出随滴灌点距离的增加而降低趋势,且集中分布在水平方向 0—30 cm,垂直方向 0—40 cm 范围,含量均在 26.80 mg/kg。4 次采样结果显示,土壤速效磷均分布在滴灌点附近,横向和径向移动距离较小,且速效磷含量呈现先升高后降低特征。

### 2.4 滴灌施肥下土壤速效钾含量时空分布特征

由图 6 可知,4 次采样结果均显示,0—40 cm 土层在水平方向土壤速效钾呈现随距离增加先降低后升高再降低趋势,其余土层含量趋于稳定。水平方向

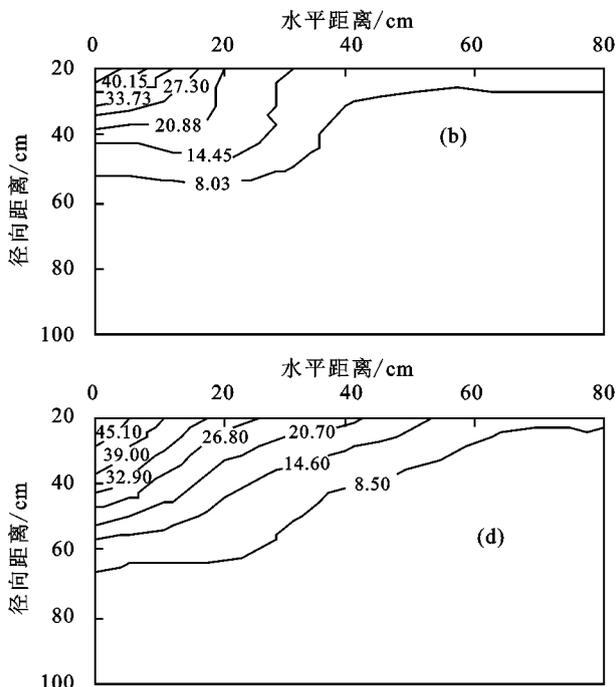
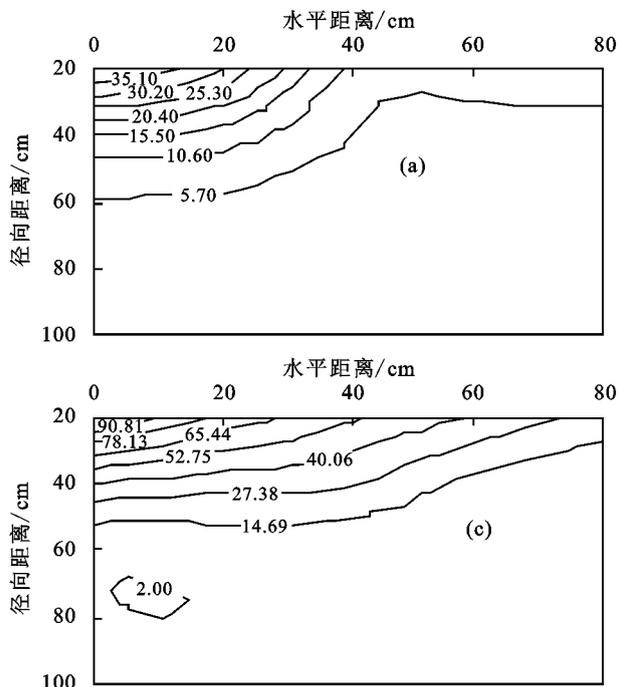
0—20 cm,垂直方向 0—30 cm 范围最高,含量均大于 145.5 mg/kg;水平方向 50—70 cm,垂直方向 0—30 cm 范围含量较高。水平方向 0—10 cm,垂直方向 0—30 cm 范围最高,含量均大于 170.3 mg/kg;水平方向 50—80 cm,垂直方向 0—30 cm 范围含量较高。水平方向 0—10 cm,垂直方向 0—30 cm 范围最高,含量均大于 280.6 mg/kg;水平方向 60 cm,垂直方向 0—20 cm 范围含量较高。水平方向 0—30 cm,垂直方向 0—30 cm 范围含量最高,均大于 210.6 mg/kg。4 次采样结果发现,土壤速效钾含量呈现先升高后降低趋势,表明植物对钾的吸收利用增加。

## 3 讨论

水分是影响土壤养分有效性的重要因素之一<sup>[14]</sup>。在滴灌条件下,土壤含水量的变化主要受灌溉制度的影响<sup>[15]</sup>;且矮化苹果树的根系分布较浅(1 m 土层内),因而土壤水分供应对果树的生长影响较大<sup>[16]</sup>。研究发现,前期土壤含水率变化主要受滴灌的影响,且水分含量高值区域分布在滴灌点附近,水分横向移动距离仅为 20 cm,垂直迁移距离深至 100 cm,土壤水分垂直迁移距离远大于水平迁移距离,随土层深度增加水平迁移距离也

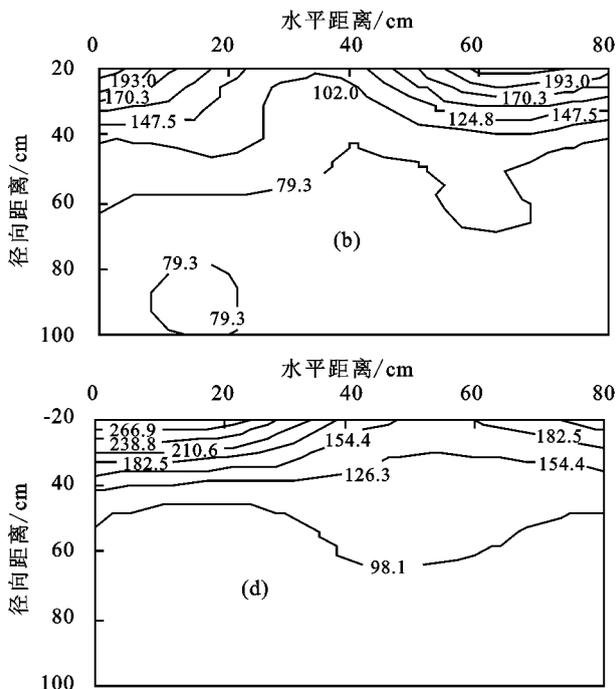
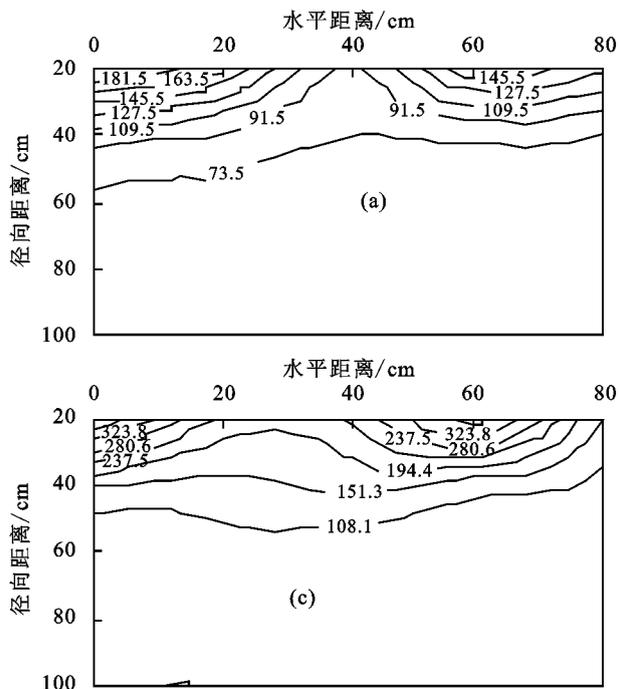
在增加。后期由于降雨量和灌溉次数的增多,水分入渗量累积,导致在 60—100 cm 深土层出现较高的土壤含水率,并在深层土壤出现水分的富集。覆盖黑色地布阻挡雨水入渗,提升土壤温度,致使深层土壤水分在水平

方向上有较明显的分布差异。而王进鑫等<sup>[17]</sup>研究表明,果实膨大期和花芽分化期需水量最多,加上夏季水分蒸发量大,从而导致 8 月 13 日土壤水分在滴灌点附近及土壤表层出现低值区域。



注:土壤剖面速效磷含量单位为 mg/kg。

图 5 滴灌条件下果园土壤剖面速效磷空间分布等值线图



注:土壤剖面速效钾含量单位为 mg/kg。

图 6 滴灌条件下果园土壤剖面速效钾空间分布等值线图

在一定灌水范围内,硝态氮含量随着土壤含水量增加而增加<sup>[18]</sup>,硝态氮在土壤中的分布和运移明显受到滴灌的影响<sup>[15]</sup>。本研究结果表明,土壤硝态氮呈现明显地随水移动规律,4 个时期土壤硝态氮均表现出从高水势向低水势区域移动,沿水分湿润区边

缘附近集中分布,硝态氮垂直运移比横向移动更显著<sup>[19]</sup>,与水分迁移分布规律密切相关。前期土壤硝态氮在水平方向迁移范围较小,且分布在果树根部附近,有利于养分的吸收利用。而后期显示硝态氮随水分蒸发增加出现向上移动趋势。在靠近滴灌点附近

的垂直方向 20—40 cm 处,由于矮化苹果树根系分布较为集中,出现硝态氮较低区域。8 月 13 日 0—70 cm 土层硝态氮含量明显比其他 3 个采样时期低,除了降水逐渐增多,硝态氮向土壤深层淋溶,可能还与苹果树春梢停止生长后,根系开始生长,对硝态氮的吸收更多有关。

磷肥的迁移主要受土壤吸附所限制,易发生吸附固定和化学反应固定<sup>[20]</sup>,因而速效磷随水移动距离偏小,仅在水平方向 0—20 cm,垂直方向 0—30 cm 范围发生积累,且越远离滴灌点含量越低,具有明显的空间分布差异,这与黄丽等<sup>[21]</sup>研究结果一致。而钾肥属于强电解质,形成的钾离子水合半径小,能在土壤中随水迁移<sup>[21]</sup>,其在土壤中的迁移机制属于“对流—吸附控制”型,随水施用在一定程度上减缓了钾肥的迁移速度<sup>[19]</sup>,速效钾迁移距离为水平方向 0—40 cm,垂直距离 0—40 cm,随水移动距离比速效磷远,水平移动距离较水分距离大。但是在 0—40 cm 深土层的水平方向上速效钾的含量整体上相对较高,然而在前 3 次采样结果水平方向 20—40 cm,第 4 次采样结果水平方向 40—50,0—40 cm 深土层速效钾含量相对较低,出现较明显的低值区域,可能是由于此区域为树冠投影边缘处,果树细根系分布较多及新生根系生长和增多,吸收较多的速效钾含量所致。

## 4 结论

(1)滴灌施肥条件下,水分能够湿润果树根系分布的有效区域,主要分布在水平方向 0—20 cm,垂直方向 0—100 cm,随时间推移,水分在深层出现明显的富集,而硝态氮则集中分布在水分湿润区边缘附近,和水分分布密切相关,表现出明显的随水移动特征。

(2)滴灌施肥条件下,土壤速效磷和速效钾富集在滴灌点区域,随水分迁移距离小,具有明显的空间分布差异特征,且随时间推移,速效磷和速效钾含量呈现先升高后降低趋势。

(3)在此方案下,水分呈现明显的深层富集,建议减少灌溉量,水分入渗深度控制在 0—40 cm,从而减少氮素淋溶流失;合理调整滴灌点与树干的距离,保证当年新生根系能吸收到充足氮、磷、钾养分。

### 参考文献:

[1] 郑小春.白水红富士苹果园土壤肥力与树体营养状况研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.  
[2] 张旭阳.陕西省苹果气候适宜性专题区划研究[D].西

安:陕西师范大学,2010.  
[3] 张林森.陕西黄土高原地区苹果园分区灌溉和施钾的效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.  
[4] 李伏生,陆中申.灌溉施肥的研究和应用[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):233-240.  
[5] 李铮,王晋民,王海景,等.蔬菜日光温室问题调查与水肥一体化技术探讨[J].土壤,2006,38(2):223-227.  
[6] Boman B J, Zekri M, Stover E. Managing salinity in citrus[J].Hort Technology,2005,15(1):108-113.  
[7] 贾中雄,李振岗,贾振华.苹果园节水增效生产技术[J].山西农业科学,2007,35(5):58-61.  
[8] 张林森,李雪薇,王晓琳,等.根际注射施肥对黄土高原苹果氮素吸收利用及产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):421-430.  
[9] 李丙智,冯焕德,张黎,等.渭北苹果园滴灌施氮肥对土壤氮迁移的影响[J].林业科学,2013,49(10):35-39.  
[10] 贺琦琦,郭向红,杨凯,等.滴灌施磷钾肥对矮砧苹果树生理生长和产量的影响[J].节水灌溉,2019(8):24-27.  
[11] 路永莉,高义民,同延安,等.滴灌施肥对渭北旱塬红富士苹果产量与品质的影响[J].中国土壤与肥料,2013(1):48-52.  
[12] 路永莉,白风华,杨宪龙,等.水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1281-1288.  
[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999.  
[14] Tan C J, Cao X, Yuan S, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil nutrients in sloping fields in regions characterized by water and wind erosion[J].Scientific Reports,2015,154(12):84-90.  
[15] 隋娟,王建东,龚时宏,等.滴灌条件下水肥耦合对农田水氮分布及运移规律的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(1):1-6,29.  
[16] 黄丽.陕北山地苹果水肥一体化灌溉制度与施肥技术研究[D].陕西 杨凌:水土保持与生态环境研究中心,2018.  
[17] 王进鑫,张晓鹏,高保山,等.渭北旱塬红富士苹果需水量与限水灌溉效应研究[J].水土保持研究,2000,7(1):69-72,80.  
[18] 李琰琰.水氮耦合对宜宾植烟土壤理化性状及烟叶产量影响的研究[D].郑州:河南农业大学,2011.  
[19] 黄耀华.滴灌施肥条件下 NPK 在紫色土中迁移分布规律研究[D].重庆:西南大学,2014.  
[20] 樊红柱,陈庆瑞,秦鱼生,等.长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J].中国农业科学,2016,49(8):1520-1529.  
[21] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.