

山东省禹城市夏玉米生长期水分利用特征分析

王冰洋¹, 陈报章^{1,2}, 孙少波², 周子渊¹, 杨志青¹, 刘禹淇¹, 张景文¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 以山东省禹城地区夏玉米农田为例, 利用氢氧稳定同位素技术测定 2015 年夏玉米生长期茎干水、大气降水以及不同深度土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 组成, 利用直接对比法和多元线性混合模型法分析夏玉米对土壤水的利用情况, 并分析农田降水—土壤水—作物水之间的转化规律。降水同位素测定结果显示禹城地区大气降水线方程为 $\delta D = 6.55\delta^{18}O - 3.03 (R^2 = 0.88)$, 斜率和截距均小于全球大气降水线, 表明蒸发是导致同位素富集的主要过程。对夏玉米生长期水分来源特征分析表明, 出苗期主要利用表层 0—15 cm 土壤水, 贡献率达 73.9%; 拔节期从土壤不同深处均吸收水分 (0—55 cm, 81.8%), 30—55 cm 处土壤水利用相对较多, 也会利用同时期降雨; 抽穗期较多利用深层土壤 (30—55 cm, 71%), 此时期浅层土壤蒸发强烈, 土壤含水量快速减少, 植物可利用水分较少。而 30—100 cm 处土壤含水量受温度, 土壤蒸发影响较小, 为夏玉米生长持续提供稳定水分。灌浆期吸收各层土壤水分的量相近 (15—100 cm, 72%), 此时期无降水, 温度下降, 蒸发减弱, 各层土壤含水量较稳定。成熟期主要吸收 30—100 cm 处的土壤水分, 贡献率达 70%, 表明降雨较少时, 夏玉米吸收土壤水分依赖于较深层土壤。此外, 夏玉米生长期水分来源受土壤体积含水量及土壤蒸发蒸腾的影响较大, 同时降雨, 大气温度及湿度会影响土壤含水量。通过水量平衡模型计算出 2015 年夏玉米在出苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期的农田蒸散量分别为 35.62, 34.99, 32.4, 22.31, 16.94 mm。研究结果对于夏玉米不同生长期节水灌溉具有指导意义。

关键词: 夏玉米; 氢氧稳定同位素; 节水灌溉

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0153-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2016.06.027

The Water-use Characteristics of Summer Corn During Growing Period in Yuchen, Shandong Province

WANG Bingyang¹, CHEN Baozhang^{1,2}, SUN Shaobo²,

ZHOU Ziyuan¹, YANG Zhiqing¹, LIU Yuqi¹, ZHANG Jingwen¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101)

Abstract: In this study, we use hydrogen and oxygen stable isotope tracer technique to determine the water isotopic compositions of precipitation, soil water at different depth and stalk of summer corn during the growing season in 2015 in Yucheng, Shandong Province. On the base of these measurements, using direct comparison and multivariate linear regression methods, we analyzed the sources of summer corn root water uptake and their contributions, and further discussed field water movement and transference laws in the precipitation-soil-crop continuum. The precipitation isotope measurements showed that the atmospheric precipitation equation was $\delta D = 6.55\delta^{18}O - 3.03 (R^2 = 0.88)$ for Yucheng area. The analyses of water source during the growing period showed that summer corn mainly used surface (0—15 cm) soil water during the seedling stage and the contribution rate was 73.9%; during the jointing stage, it mainly imbibed water from the 0—55 cm soil layer (81.8%), and the water from the 30—55 cm soil layer was used relatively more. In addition, the precipitation was also significantly used during this period. In contrast, the water used was mostly from deeper soil layer during the heading stage (30—55 cm, 71%). During this period, the evaporation

收稿日期: 2016-06-19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41571504); 国家科技支撑计划项目 (2013BAC03B04)

第一作者: 王冰洋 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文学研究。E-mail: 15624954329@163.com

通信作者: 陈报章 (1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事表层地球系统模拟研究。E-mail: baozhang_chen@igsrr.ac.cn

was high and soil water content decreased rapidly in the shallow soil layer, and water that could be used by plants was less. Because the water content in the deeper soil layer (30—100 cm) was less affected by air temperature and soil evaporation, it could provide water for summer corn during the heading stage stably. During the filling stage, the amount of soil water absorbed from each layer was similar (15—100 cm, 72%); the precipitation was small, the temperature dropt, the evaporation decreased, and soil water content in each layer was relatively stable. During the mature stage, the summer corn mainly absorbed water from the 30—100 cm soil layer and the contribution rate was 70%, indicating that the absorption of soil water of summer corn mainly relied on deeper soil layers when the precipitation was small. Furthermore, the results showed that the water sources of summer corn were significantly affected by soil water content and soil evapotranspiration, meanwhile, precipitation, air temperature and humidity affected soil water content. The water balance model showed that the evapotranspiration of summer corn during the seedling, jointing, heading, filling and mature stage was 35.62, 34.99, 32.4, 22.31, 16.94 mm, respectively. This study presents guidelines for summer corn water-saving irrigation during different growth stage in Yucheng area.

Keywords: summer corn; deuterium and oxygen-18 isotopes; water-saving irrigation

近年来,随着同位素技术的发展,水的氢氧稳定同位素分析广泛应用于水体研究,为理解土壤—植被—大气系统水分运移机理提供了技术手段。利用氢氧稳定同位素测定农田水分循环过程对于农业节水灌溉、提高水利用效率具有重要价值^[1-2]。国内外研究者通过稳定同位素测定对农田土壤水分运移过程、作物水分来源以及作物不同生长时段水分利用效率等方面做了大量研究。如郭飞等^[3]比较了目前常用的直接推断法、多元线性模型、耦合模型和吸水深度模型 4 种基于氢氧同位素的植物水源区分方法的适用条件、依据、准确性与精度等优缺点;马菁等^[4]研究分析了元阳梯田水源区大气降水及土壤水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化特征,并着重探讨了降水对土壤水的影响,结果表明土壤越深,受降水及外界影响越小;王卓娟等^[5]基于氢氧稳定同位素技术对元阳梯田水源区旱冬瓜水分来源进行了定性和定量分析,准确认识了该区的水分来源;边俊景等^[6]总结了干旱区植物水分来源氢氧稳定同位素示踪研究进展;王鹏等^[7]在山西省运城市研究了夏玉米在不同生长期的水分利用深度,同时得出华北农田夏玉米的耗水规律;孙宁霞等^[8]利用氢氧稳定同位素示踪法研究了北京大兴区夏玉米生长期间土壤水动态变化规律,同时分析了当地降水和土壤水稳定同位素变化特征,发现夏玉米生长期 0—60 cm 为活跃层,60—120 cm 为次活跃层;Yang 等^[9]通过氢氧稳定同位素测定分析发现黑河中游地区玉米灌溉深度远超过玉米生长期吸水深度。由此可见采用氢氧稳定同位素技术分析各种植物的水分来源已广泛应用于多种植物。

尽管有学者研究过夏玉米生长期的降水及土壤水的同位素变化特征,由于土壤水分运动复杂、大气降水与土壤水相互影响、仪器设备等条件限制,使得

研究结果相差较大,因此利用同位素技术研究夏玉米生长期水分利用特征,分析降水—土壤水—作物水的转化规律,仍是必不可少的,同时对农田节水灌溉具有较大经济价值。夏玉米是山东省主要粮食作物之一,在山东省粮食生产中占重要地位^[10]。

本文以山东省禹城农业试验站 2015 年夏玉米为研究对象,利用同位素技术对当地大气降水,农田各层土壤水及作物茎干水的同位素变化进行示踪,获取降水、土壤水、茎干水的氢氧同位素值,并结合大气温度、湿度、土壤含水量及土壤蒸发量进行分析,得出夏玉米生长期的水分来源及贡献率,进而研究农田降水—土壤水—作物水的转化规律。研究结果对于山东省禹城市水资源的合理利用和农业高效用水具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院禹城综合试验站(简称禹城站)(116.39°E,36.56°N),平均海拔高度约 20.0 m。禹城站地处黄淮海平原的腹地,地貌类型为黄河冲积平原,土壤母质为黄河冲积物,以潮土和盐化潮土为主,土壤质地以粉砂和轻壤为主。该区属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,多年平均温度 14℃,多年平均降水量 600 mm,降雨分配极不均匀,春季 3—5 月仅占年降水量的 12%左右,夏季 6—8 月占全年降水的 70%。该地区黄河古道形成的风沙化土地、渍涝盐碱地、季节性积水涝洼地相间分布,历史上干旱、渍涝、盐碱、风沙等自然灾害频繁,生态环境脆弱,但生产潜力很大,是黄淮海平原的主要农业生产区。该研究区的农业生产以夏玉米—冬小麦一年两熟为主。

1.2 样品采集

1.2.1 降水样品 试验期降水样品通过样地随机布

设自制降水采集装置来获取。在雨量筒上方安装圆形漏斗汇集降水,并在漏斗口的上方放置一个乒乓球防止采集的降水样蒸发。将收集的降水样品放置于 50 ml 塑料离心管中,离心管要盛满水样,确保无气泡后用 Parafilm 膜密封,迅速冷冻处理,防止水分蒸发损失。

1.2.2 土壤样品和生长期玉米样品 分别在夏玉米的出苗期(2015 年 6 月 28 日)、拔节期(2015 年 8 月 7 日)、抽穗期(2015 年 8 月 24 日)、灌浆期(2015 年 9 月 17 日)及成熟期(2015 年 10 月 10 日)采集土壤样品,在样地内临近采集植物样品的位置,利用土钻按 0—5,5—15,15—30,30—55,55—80,80—100 cm 6 个层次取土样,每个层次 6 次重复。为防止蒸发引起同位素分馏效应,样品采集后立即放入 50 ml 塑料离心管中,用 Parafilm 膜密封,注明采样时间,带回实验室迅速冷冻保存至同位素测定。

与此同时,采集玉米样品时,选取土壤样品采集点附近 3~5 株长势良好的植株,采集茎秆后立即放入 50 ml 塑料离心管中,用 Parafilm 膜密封,注明采样时间,带回实验室迅速冷冻保存至同位素测定。

1.3 样品处理

测定土壤水和夏玉米茎干水同位素值之前,首先对样品进行预处理(2015 年 7 月至 11 月):通过低温真空冷凝法抽提土壤水及夏玉米茎干水。若单次提取过程中抽提的水分不足测试所需的最低水量(0.5 ml),需多次反复抽提获取满足试验要求的样品水量。抽提试验装置为 LI-2000 植物土壤水分真空抽提系统,单次抽提率达到 98% 以上。

土壤水及夏玉米茎秆水同位素值测定采用的仪器为 LGR 908-0008 液态水同位素分析仪,氢同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 的测定精度分别达到 0.3‰ 和 0.1‰。测得的水样中氢氧同位素含量为“与标准平均大洋水(SMOW)”的千分差,表示为

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000 \quad (1)$$

式中: R_{sample} 为水样中 D 或 ^{18}O 的浓度; R_{standard} 为 SMOW(Standard Mean Ocean Water,标准平均海洋水)中 D 或 ^{18}O 的浓度。

2 结果与分析

2.1 大气降水线方程

土壤中的绝大部分水分来源于大气降水,分析降水氢氧同位素值的变化特征是研究土壤水的前提。全球或特定区域陆地大气降水氢—氧同位素间的线性关系线称为全球大气水线(Global Meteoric Water Line—GMWL)或区域大气水线(Local Meteoric Water Line,LMWL)。大气降水线能够反映一个地区气候干旱或湿润情况和降雨过程中蒸发、凝结的

不平衡程度^[11-12]。Craig^[13]分析了全球降水、河水、湖水和雪水样共计 400 个样,得出全球大气降水线方程: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$; Wetzel^[14]利用瑞利分馏曲线和瑞利蒸发模型重新计算得出全球大气降水线方程: $\delta D = 7.82\delta^{18}O + 8.90$,这一结果更为准确。本研究利用收集的山东省禹城市 2015 年 6 月至 12 月共计 21 次降雨通过线性拟合得出研究区大气降水线方程为:

$$\delta D = 6.55\delta^{18}O - 3.03 \quad (2)$$

式中: δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为降水中相应的氢和氧稳定同位素值。

由图 1 可以看出, δD 与 $\delta^{18}O$ 间存在较好的线性关系,决定系数(R^2)达到 0.88; δD 分布于 $(-18.74\text{‰}) \sim (-81.71\text{‰})$ 之间,平均值为 -45.21‰ , $\delta^{18}O$ 位于 $(-2.14\text{‰}) \sim (-11.94\text{‰})$ 之间,平均值约为 -6.44‰ ; 与全球大气降水线方程($\delta D = 7.82\delta^{18}O + 8.90$)相比, (2)式斜率和截距均较小,表明研究区大气降水同位素在降水过程中经过了强烈的蒸发分馏,同时受局地水汽蒸发影响较大,可能存在再蒸发的过程,这与研究区的空气温度、湿度、季节等密切相关。

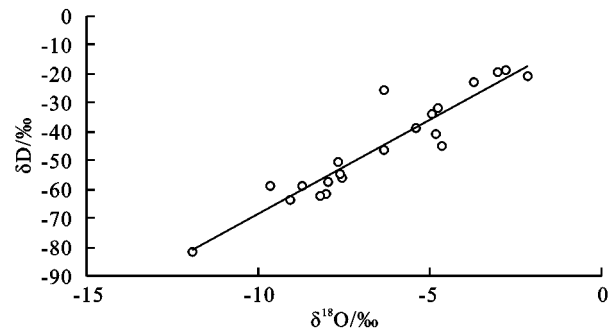


图 1 山东省禹城市 2015 年大气降水氢氧稳定同位素特征分布

2.2 大气降水中 $\delta^{18}O$ 与温度、降雨量的关系

温度作为影响降雨氢氧同位素组成最为关键的因子影响降水云团的冷凝温度,而冷凝温度则与同位素分馏影响下的降水 δ 值直接相关^[15]。图 2 为 2015 年禹城市逐日降雨量和日平均温度的变化特征。从图 2 可以看出,温度随季节显著变化,7—8 月份温度最高达 31℃,冬季最低温度为 -8℃ ,年平均温度为 13.7℃;降水多集中在春季和夏季,最大降水出现在 8 月份,最大日降水量达 96.20 mm,2015 年降水量为 497.35 mm。

试验期间降雨量与 $\delta^{18}O$ 关系(图 3)表明:氧同位素值随降水变化显著,降水导致 $\delta^{18}O$ 显著下降;分析降水 $\delta^{18}O$ 与降水量之间的关系发现,在降水较多的夏季,当降水量较大时 $\delta^{18}O$ 值显著降低,在秋季降水较少时 $\delta^{18}O$ 随时间缓慢下降;总体上大气降水 $\delta^{18}O$ 分析证实了章新平等^[16]得出的 $\delta^{18}O$ 降水量效应。对比图 2 可看出,由于夏季气温较高,降水频率较高

使得空气中的相对湿度增加,降水过程中蒸发减弱, $\delta^{18}\text{O}$ 富集作用不显著,故降水量较多的时间中 $\delta^{18}\text{O}$ 减小;而降水量较小的时间中,由于温度较高,空气干燥,蒸发增加,使 $\delta^{18}\text{O}$ 骤增,干湿季节交替对 $\delta^{18}\text{O}$ 值产生很大影响。

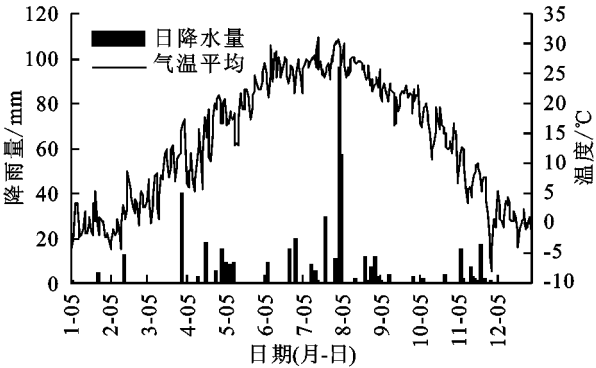


图 2 山东省禹城市 2015 年逐日降雨量、日平均温度变化特征

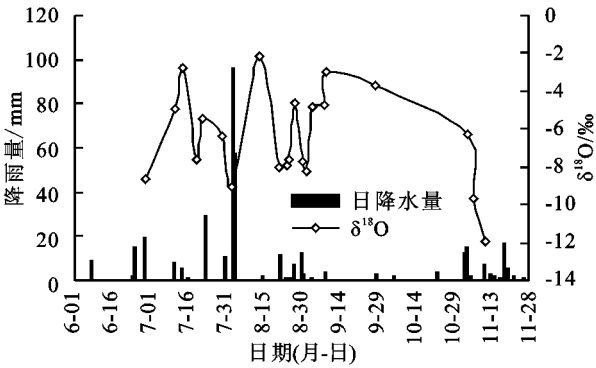


图 3 山东省禹城市 2015 年降雨量与 $\delta^{18}\text{O}$ 间的关系

2.3 土壤体积含水量与土壤蒸发量

2.3.1 土壤体积含水量的动态变化 土壤水是土壤—大气—植物系统中连接地表水、地下水和植物水的纽带,是植物赖以生存的来源。土壤水的变化能够直接反映植物的生存生长状态。从图 4 可以看出,受降水入渗补给和土壤本身蒸发蒸腾消耗等的影响,各层土壤的体积含水量有明显的变化。降水能在短期内提高土壤含水量,但在随后强烈的蒸腾蒸发作用下,土壤含水量逐渐减少。土壤体积含水量受降雨影响较大,进一步影响土壤水氢氧同位素含量,表明土壤水分很大一部分来源于降水。不同深度的土壤含水量不同,但各层土壤含水量的总体趋势一致。夏玉米生长期主要在 6 月底至 10 月初,此时期降雨较多,且 8 月上旬降雨强度最大。夏玉米耗水的影响使各生长期土壤剖面含水量存在明显的变化特征。对比不同深度的土壤含水量可看出,表层土壤蒸发强烈,因此 5 cm 处土壤体积含水量低于 15 cm 处土壤体积含水量,30 cm 处土壤体积含水量显著低于 55 cm 处的土壤体积含水量,尤其是在夏玉米抽穗期和灌浆期,表明夏玉米在该生长期,根系很有可能吸收该层土壤的水分。夏玉

米出苗期,对土壤水的吸收利用较少,主要依靠浅层 0—5,5—15 cm 处的土壤。6 月份 5,15 cm 处土壤含水量变动较大,而深层土壤 30,55 cm 处含水量保持稳定也证实了这一点。待 7—9 月夏玉米进入旺盛生长期,加上气温逐渐上升,降水较多,此时土壤含水量波动较大。夏玉米成熟期时,植物生长能力衰退,需水量降低,此时土壤含水量也较稳定。

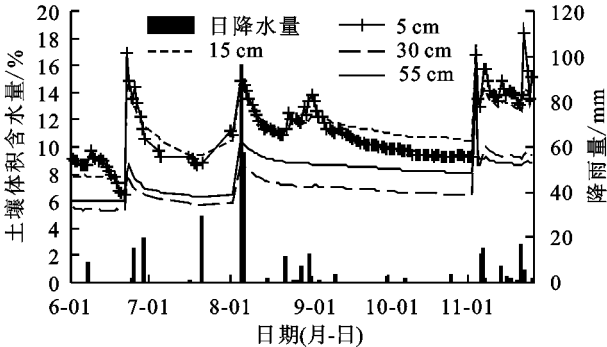


图 4 山东省禹城市 2015 年夏玉米不同生长期土壤剖面体积含水量的变化

2.3.2 大气湿度与土壤蒸发量的关系 大气湿度是影响土壤蒸发的重要因素之一。大气湿度较高,水汽接近饱和时,土壤能够持续保持湿润,相对地,蒸腾蒸发较慢,因此作物需水量较小。反之,大气湿度越小,土壤蒸发越强烈,因此作物需水量增加。对比试验期间大气湿度与 20 cm 处土壤蒸发量的关系(图 5)可看出,6 月中旬土壤蒸发量达到最大值,结合图 2 分析认为 6 月中旬温度较高,降水较少,同时空气的湿度也较低,因此该时段土壤蒸发较强。8 月初虽然温度达到最高值 31 °C,由于该时期处于雨季,降水量丰富,同时大气湿度较高,土壤蒸发量低于 6 月中旬的蒸发量,可见降雨量对土壤蒸发的强弱影响较大。图 5 表明,大气湿度与土壤蒸发量呈负相关关系,大气湿度越高,土壤蒸发量越低;反之,大气湿度越低,土壤蒸发量越高。大气温度、湿度会影响土壤蒸发蒸腾,从而影响土壤含水量及夏玉米的需水量。夏玉米生长期的水分来源于土壤,根系吸收土壤水分,从而影响土壤含水量。因此大气—土壤—植物之间水分运移较为复杂,各项之间相互影响,相互制约。

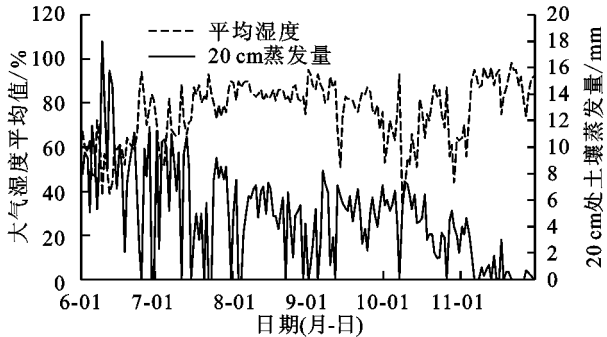


图 5 山东省禹城市 2015 年大气湿度与 20 cm 处土壤蒸发量的关系

2.4 研究区的水量平衡计算

水量平衡模式,即以一定深度的土壤作为系统,通过测定其一段时间一定范围内土壤含水量的变化,利用降水量资料及输入、输出水分等有关各项,根据水分收支平衡原理来推算区域内农田的实际蒸散量。此模型无需考虑各影响因素的机理过程,只考虑总水分的输入及输出。

$$W_s = P + M - R_s - ET \pm BW \tag{3}$$

式中: W_s 为时段内土壤含水量的变化,即土壤水蓄变

量; P 为时段内的总降水量; M 为时段内灌溉水总量; R_s 为时段内的地表径流量; BW 为下边界与深层土壤水分的交换,即深层渗漏量; ET 为农田蒸散量。由于研究区地形平坦,不考虑地表径流, $R_s=0$ 。夏玉米各时期的时间段内无灌溉, $M=0$ 。

根据试验测得相关数据,得出 2015 年夏玉米 0—100 cm 深度土壤水量平衡(表 1),经计算得出夏玉米出苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期的农田蒸散量分别为 35.62,34.99,32.40,22.31,16.94 mm。

表 1 山东省禹城市 2015 年夏玉米 0—100 cm 土层土壤水量平衡 mm

生育期	降雨量 P	灌溉量 M	土壤水蓄 变量 W_s	地表径 流量 R_s	深层渗漏 量 BW	农田蒸散 量 ET
出苗期(6-15 至 7-15)	50.5	0	11.61	0	3.27	35.62
拔节期(7-16 至 8-10)	194.2	0	153.32	0	5.89	34.99
抽穗期(8-11 至 8-31)	35.2	0	1.55	0	1.25	32.40
灌浆期(9-15 至 9-30)	2.4	0	−19.91	0	0	22.31
成熟期(10-1 至 10-31)	5.0	0	−11.94	0	0	16.94

2.5 夏玉米各生长期的水分来源分析

2.5.1 直接对比法判断植物水分来源 直接对比法是通过不同层次的土壤水与植株茎秆水同位素组成进行直接对比获取作物利用土壤水的主要土壤分层。根据作物茎水稳定同位素值的垂线与土壤水稳定同位素剖面的交点得到作物根系吸收土壤水的主要深度。研究中首先利用直接对比法将各层土壤水同位素组成与夏玉米茎干水的同位素组成进行对比直接确定夏玉米各生长期利用土壤水的主要深度。图 6 为分析试验采集的土壤和植物茎干样品的同位素特征得到土壤水和茎干水的氢同位素剖面变化。从图 6 可以看出,夏玉米出苗期茎干水与土壤水稳定同位素剖面只有一个交点,位于(−87.80‰,6)处,即土壤深度 6 cm,同位素值−87.80‰处。考虑土壤水分传输影响,认为整个夏玉米出苗期吸收的水分主要来自 0—15 cm 处的浅层土壤;拔节期茎秆水与土壤水稳定同位素剖面有 3 个交点,交点深度分别为 10,32,56 cm 处,同位素值−93.47‰处,可以看出拔节期夏玉米从土壤中吸水深度从浅层土壤增加到深层土壤,这既与拔节期植株生长大量需水有关,也与根系快速生成有关;抽穗期茎秆水与土壤水稳定同位素值相交于 36,50 cm;灌浆期茎秆水与土壤水稳定同位素值交点多达 4 个,分别为 8,19,28,78 cm,表明这一生长期夏玉米需要从 5—30,55—80 cm 处土壤吸取大量水分;成熟期茎秆与土壤水稳定同位素值相交于 33,89 cm。对比夏玉米生长期不同阶段茎秆与土壤水交点特征,发现根系吸水深度存在较大差异,其中拔节期和灌浆期根系吸水来源于浅层到深层多个深度,这对于夏玉米节水灌溉具有指导意义。

分析图 6 中夏玉米生长期不同阶段根系吸水特征,表 2 给出了初步判断的根系吸水深度。

表 2 山东省禹城市 2015 年夏玉米不同时期可能的水分来源(直接相关法) cm

时期	出苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
	0—5	0—5	30—55	5—15	30—55
水分来源	5—15	5—15 30—55	55—80	15—30 55—80	80—100

2.5.2 多元线性混合模型确定植物水分来源的贡献率 在对植物和土壤样品的氢氧稳定同位素值测定基础上,利用 IsoSource 软件提供各水分来源的可能组合,并根据频次直方图估算各土壤深度对根系吸水的贡献比率^[16]。图 7 为夏玉米出苗期吸收各个深度土壤水的可能性的频率分布直方图,其中横坐标表示各层土壤水对夏玉米的贡献率,贡献率越接近 1 表示该来源水对夏玉米的贡献率越大。纵坐标表示来源水对夏玉米的某一确定贡献率所出现的频率,频率越高表示夏玉米最可能吸收该来源的水。出苗期夏玉米主要吸收 0—5,5—15 cm 土壤处的水分,贡献率分别为 63.1%和 10.8%;夏玉米拔节期土壤各层的贡献率分别为 20.8%,19.7%,11.1%,30.2%,10.9%和 7.3%,可以看出夏玉米在拔节期从土壤不同深处均吸取水分,主要集中在 0—5,5—15,30—55 cm(图 8);抽穗期各层土壤水分贡献率分别为2.5%,2.9%,6.2%,71%,6.7%和 10.6%,表明夏玉米在抽穗期主要是利用 30—55 cm 和 80—100 cm 处的土壤水分(图 9);灌浆期各层土壤水的贡献率分别为 11.5%,16.5%,19.2%,17.2%,17.9%(图 10);成熟期主要是吸收 30—100 cm 处的土壤水分,贡献率分别为 23.6%,25.6%和 20.8%(图 11)。

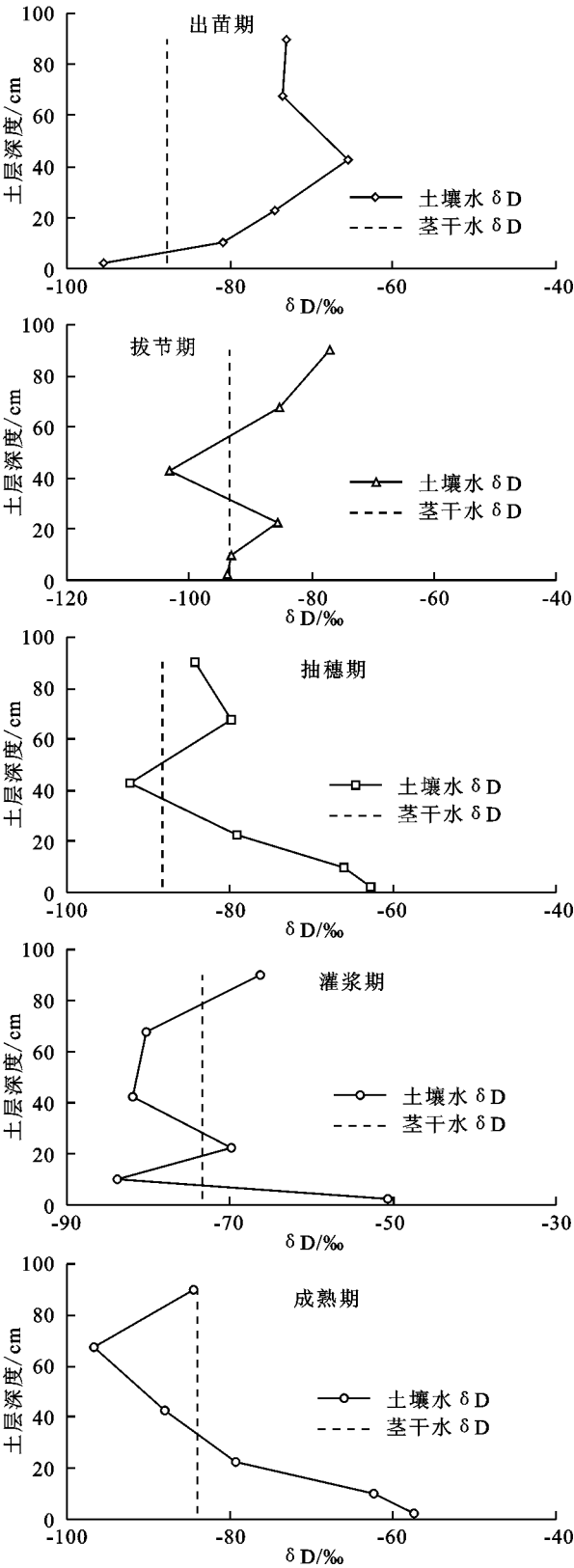


图 6 山东省禹城市 2015 年夏玉米各个生长期土壤水及茎干水 δD 的特征

3 讨论

通过对比夏玉米各生长期茎干水氢氧同位素和
各层土壤水氢氧同位素的组成情况,结合各层土壤
含水量,判断夏玉米的水分利用情况。本研究判断
出夏玉米出苗期主要利用 0—15 cm 处的土壤水分;

拔节期以 0—15,30—55 cm 为主要水源;抽穗期主要
水分来源为 30—80 cm;灌浆期以 5—30,55—80 cm
为主要水分来源;成熟期的主要水分来源为 30—55,
80—100 cm。

由于植物茎干水是不同层次不同水源的混合,直
接对比法不能给出不同水源对植物的贡献率,因而从
表 2 中无法判断夏玉米在各个生长期水分来源是否
有差异。不同于直接对比法,多元线性混合模型可以
计算多个水分来源,评估不同潜在水源的可能性贡
献,弥补二元/三元线性模型方法在水分来源过多时
不能生成唯一解的不足^[17-18]。利用多元线性混合模
型定量分析夏玉米水分来源,结果表明,出苗期(2015
年 6 月 28 日)夏玉米主要吸收 0—5,5—15 cm 土壤
水分,贡献率分别为 63.1%和 10.8%,此时夏玉米主
要吸收浅层土壤水分,由于采集样品前有降雨,浅
层土壤水分大部分来源于降雨,可推出夏玉米出苗
期主要利用最近的降雨;拔节期(2015 年 8 月 7 日)
各层土壤的贡献率分别为 20.8%,19.7%,11.1%,
30.2%,10.9%和 7.3%,夏玉米在拔节期从土壤不
同深处均吸收水分,主要集中在 0—5,5—15,30—55
cm,总体来说 30—55 cm 处土壤水利用较多,8 月初
温度较高,土壤蒸发强烈,同时有较强降水的补给使
土壤水分条件得到充分改善,可看出夏玉米利用已有
的土壤水分,也会利用最近的降雨;抽穗期(2015 年 8
月 24 日)各层土壤水分贡献率分别为 2.5%,2.9%,
6.2%,71%,6.7%和 10.6%,表明夏玉米在抽穗期
主要利用 30—55 cm 和 80—100 cm 处的土壤水分,
由于 8 月份温度持续较高,抽穗期期间几乎无降雨,
浅层土壤蒸发强烈,因此浅层土壤含水量大幅减少,
而 30—55,80—100 cm 处土壤含水量受温度,土壤蒸
发影响较小,为夏玉米生长提供水分;灌浆期(2015
年 9 月 17 日)各层土壤水的贡献率分别为 11.5%,
16.5%,19.2%,17.2%,17.9%,表明总体上灌浆期
吸收各层土壤水分的量相近,此时期无降水,温度降
低,蒸发减弱,各层土壤含水量较稳定;成熟期(2015
年 10 月 10 日)主要是吸收 30—100 cm 处的土壤水
分,贡献率分别为 23.6%,25.6%和 20.8%,说明降
雨较少时,夏玉米依赖于较深层土壤。

直接对比法与多元线性混合模型方法对比分析
结果可看出,2 种方法得出的夏玉米各生长期根系吸
水深度的结论基本一致,但后者能定量地得出不同水
分来源的贡献率。同时,结合大气温度、湿度、降雨量
和土壤含水量变化特征及水量平衡,分析了夏玉米农
田降水—土壤水—作物水之间的转化规律,对山东省
禹城市农田水资源的合理利用提供理论依据。

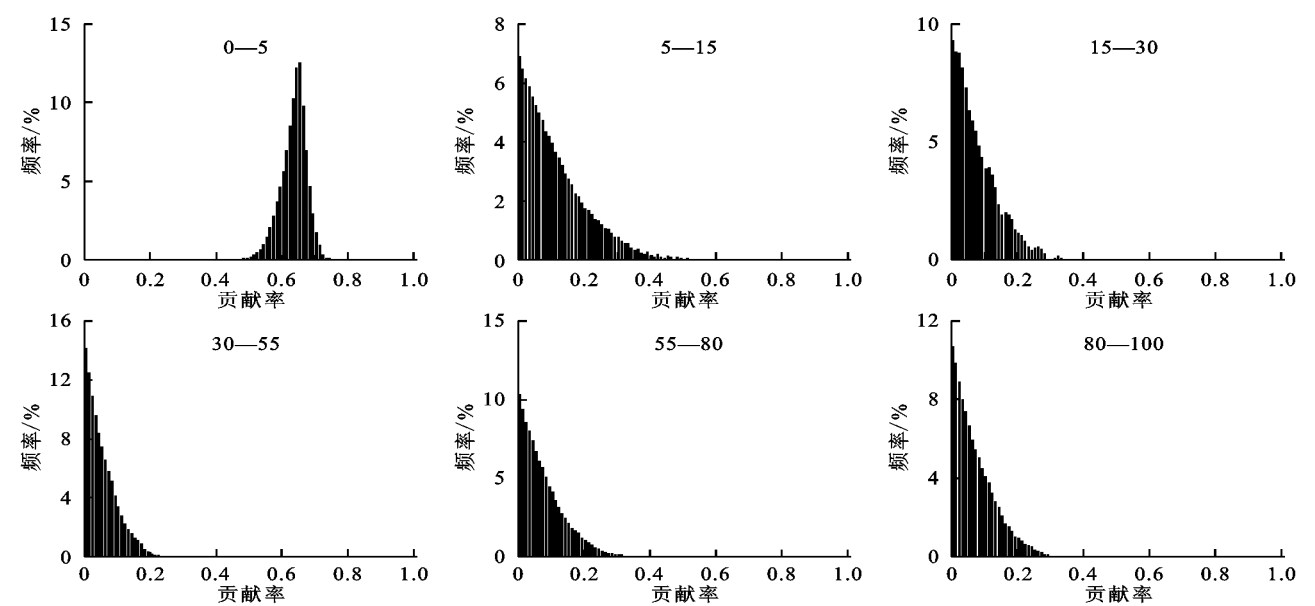


图 7 山东省禹城市 2015 年夏玉米出苗期不同深度土壤水贡献率

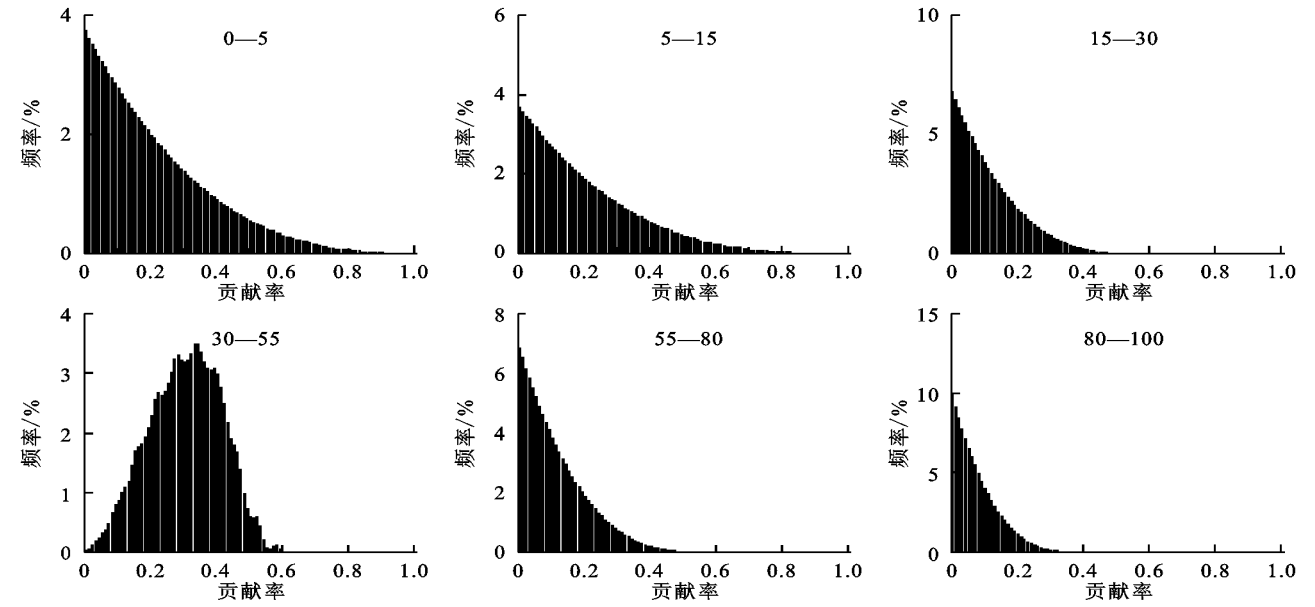


图 8 山东省禹城市 2015 年夏玉米拔节期不同深度土壤水贡献率

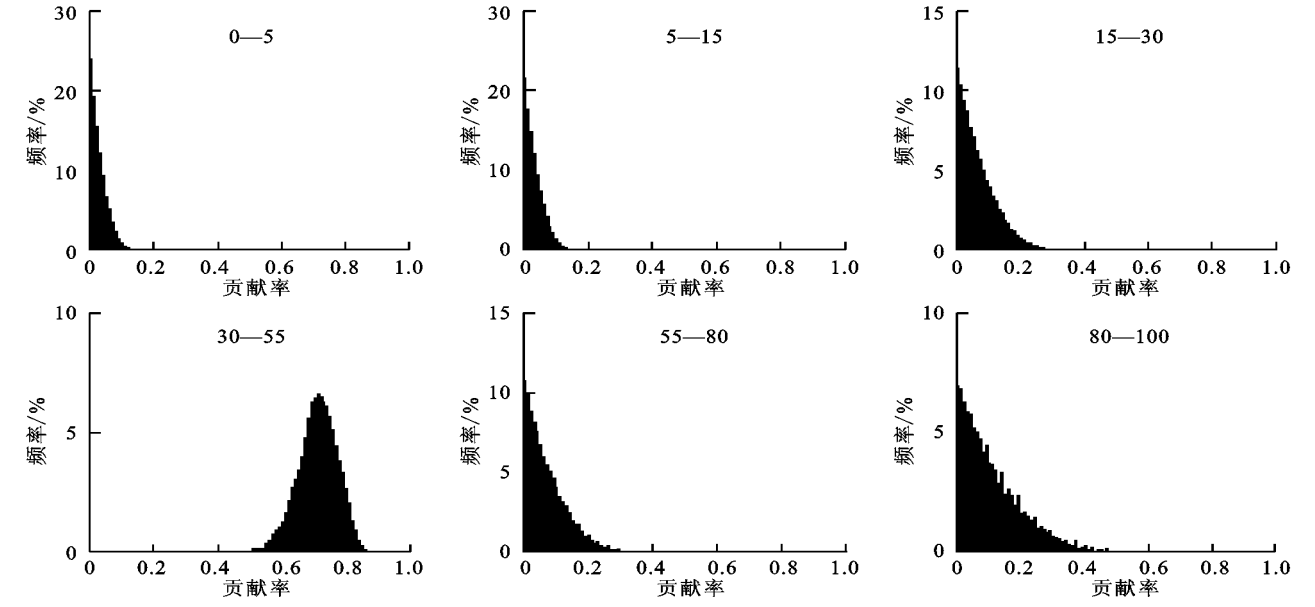


图 9 山东省禹城市 2015 年夏玉米抽穗期不同深度土壤水贡献率

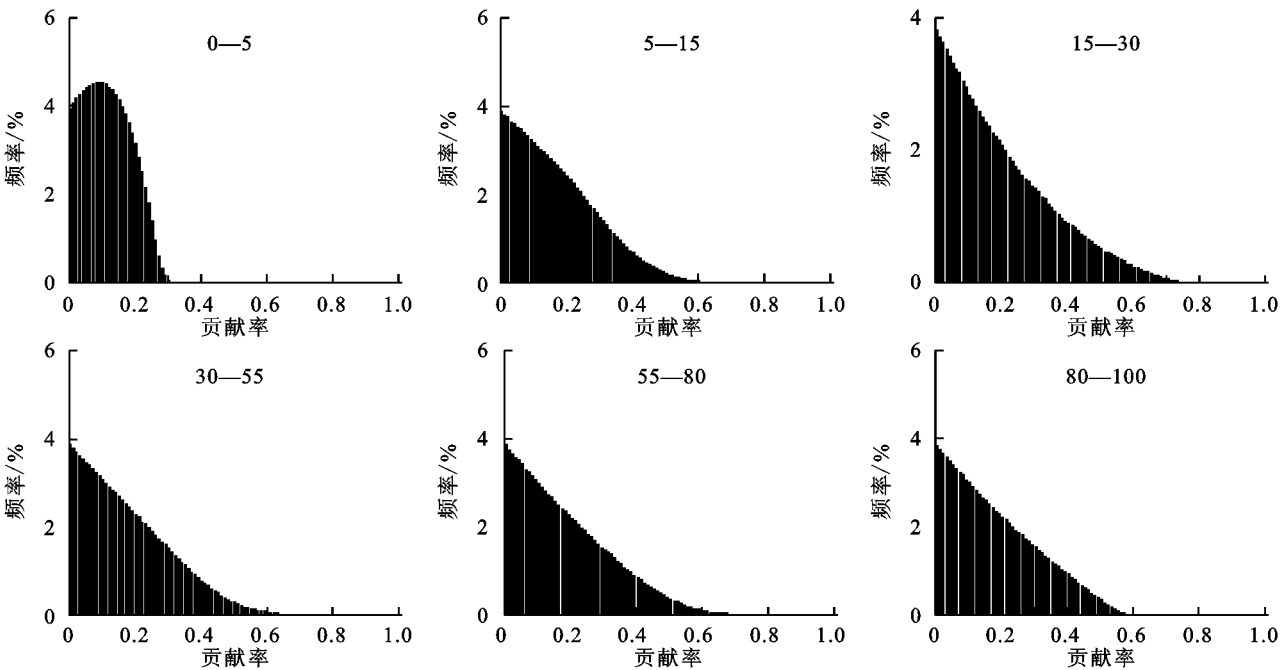


图 10 山东省禹城市 2015 年夏玉米灌浆期不同深度土壤水贡献率

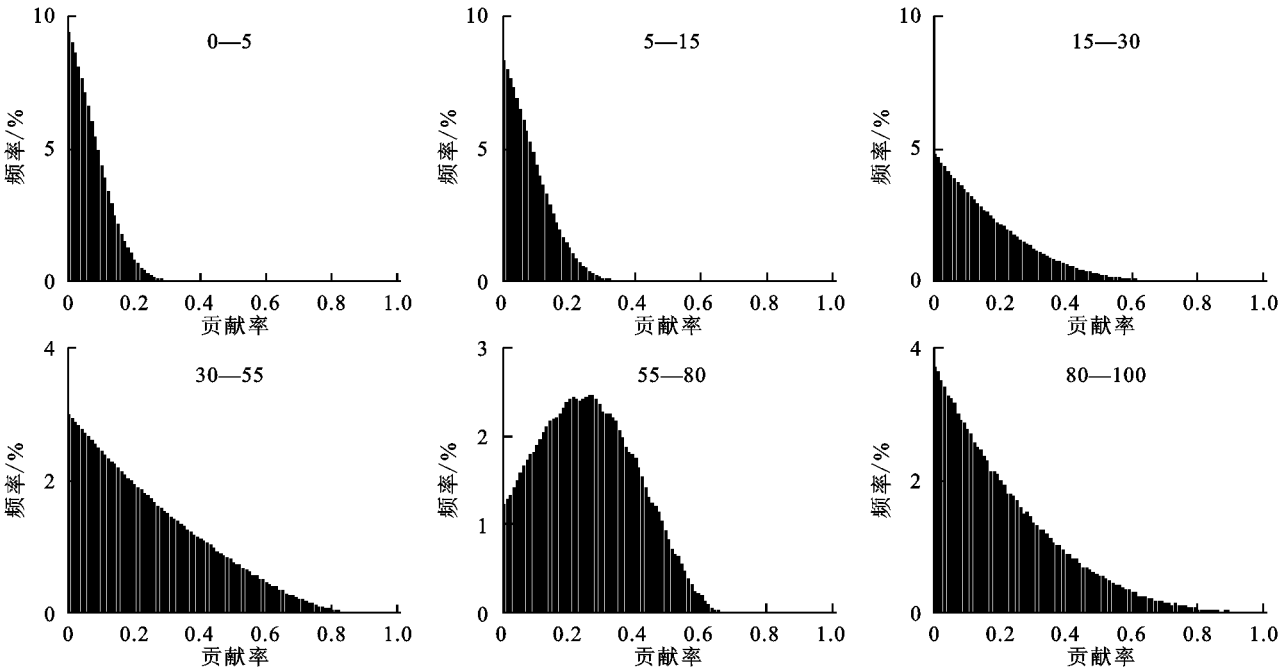


图 11 山东省禹城市 2015 年夏玉米成熟期不同深度土壤水贡献率

4 结论

本文以 2015 年山东省禹城市夏玉米农田为例，基于氢氧稳定同位素示踪技术研究了夏玉米生长期水分利用特征，分析了夏玉米农田降水—土壤水—作物水之间的转化规律。研究表明：

(1)研究区大气降水线方程为： $\delta D=6.55\delta^{18}O-3.03$ ，方程斜率和截距明显小于全球大气降水线，表明禹城地区大气降水同位素在降水过程中经过了强烈的蒸发分馏。

(2)夏玉米生长期的土壤体积含水量波动较大，主要是受到降雨及夏玉米生长期根系吸水的影响。利用水量平衡模型得出 2015 年夏玉米出苗期、拔节期、抽

穗期、灌浆期、成熟期的农田蒸散量分别是 35.62，34.99，32.4，22.31，16.94 mm。

(3)利用直接对比法和多元线性混合模型计算夏玉米生长期对土壤水分的利用情况，表明夏玉米出苗期主要利用表层 0—15 cm 土壤水(73.9%)，拔节期从土壤不同深处均吸收水分，30—55 cm 处土壤水利用较多，同时也会利用同时期降雨；抽穗期较多利用深层土壤，此时浅层土壤蒸发强烈，且其含水量大幅减少，而 30—100 cm 处土壤含水量受温度，土壤蒸发影响较小，为夏玉米生长提供稳定水分；灌浆期吸收各层土壤水分的量相近，此时期无降水，温度降低，蒸发减弱，各层土壤含水量较稳定；成熟期主要是吸收

30—100 cm 处的土壤水分,贡献率达 70.0%,表明降雨较少时,夏玉米依赖于较深层土壤。通过研究不同深度土壤对夏玉米各生长期的水分贡献率,可看出夏玉米在整个生长期内,根系吸水深度由浅变深,由此考虑在夏玉米的出苗期和拔节期可适当减小灌溉量,生长后期改变灌溉方式来提高灌溉水利用率。

参考文献:

[1] 张玉翠,孙宏勇,沈彦俊,等. 氢氧稳定同位素技术在生态系统水分耗散中的应用研究进展[J]. 地理科学, 2012,32(3):289-293.

[2] Martingómez P,Barbeta A,Voltas J,et al. Isotope-ratio infrared spectroscopy: A reliable tool for the investigation of plant-water sources? [J]. New Phytologist, 2015,207(3):914-927.

[3] 郭飞,马娟娟,郑利剑,等. 基于氢氧同位素的植物水源区分方法比较[J]. 节水灌溉,2015(11):59-63.

[4] 马菁,宋维峰,吴锦奎,等. 元阳梯田水源区林地降水与土壤水同位素特征[J]. 水土保持学报,2016,30(2):243-248.

[5] 王卓娟,宋维峰,吴锦奎,等. 元阳梯田水源区旱冬瓜水分来源[J]. 广西植物,2016,36(6):713-719.

[6] 边俊景,孙自永,周爱国,等. 干旱区植物水分来源的 D、¹⁸O 同位素示踪研究进展[J]. 地质科技情报,2009, 28(4):117-120.

[7] 王鹏,宋献方,袁瑞强,等. 基于氢氧稳定同位素的华北农田夏玉米耗水规律研究[J]. 自然资源学报,2013,28 (3):481-491.

[8] 孙宁霞,马英,胡晓农,等. 基于同位素示踪的夏玉米土壤水分动态变化规律[J]. 灌溉排水学报,2014,33(4):

256-260.

[9] Yang B,Wen X,Sun X. Irrigation depth far exceeds water uptake depth in an oasis cropland in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Scientific Reports,2015, doi:10. 1038/srep15206.

[10] 朱峰,孙兆明,李树超. 山东省玉米生产现状与发展对策分析[J]. 农业科技通讯,2015(3):6-9.

[11] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus,1964,16(4):436-468.

[12] 徐庆,刘世荣,安树青,等. 卧龙地区大气降水氢氧稳定同位素特征的研究[J]. 林业科学研究,2006,19(6): 679-686.

[13] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science,1961,133(3465):1702-1703.

[14] Wetzel K. A new interpretation of the meteoric water line[J]. Isotopenpraxis,1988,24(8):311-317.

[15] Yapp C J. A model for the relationship between precipitation D/H ratios and precipitation intensity[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1982, 87 (C12):9614-9620.

[16] 章新平,姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报,1998,53(4):356-364.

[17] Phillips D L,Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes:Coping with too many sources[J]. Oecologia,2003,136(2):261-269.

[18] Wang P,Song X F,Han D M,et al. A study of root water uptake of crops indicated by Hydrogen and Oxygen stable isotopes:A case in Shanxi Province, China[J]. Agricultural Water Management,2010,97(3):475-482.

(上接第 152 页)

[11] 王庆,李智广,高云飞,等. 基于 DEM 及高分辨率遥感影像的西北黄土高原区侵蚀沟道普查[J]. 中国水土保持,2013(10):61-64.

[12] 石磊,杨武年,陈平,等. DEM 空间尺度对岷江上游流域特征提取的影响[J]. 测绘科学技术学报,2015,32 (1):82-86.

[13] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1305-1325.

[14] 刘爱利,汤国安,秦鸿儒. 不同栅格分辨率数字坡度模型转换图谱研究[J]. 水土保持学报,2002,16(1):144-147.

[15] Yang X,Tang G A,Xiao C C,et al. The scaling method of specific catchment area from DEMs[J]. Journal of Geographical Sciences,2011,21(4):689-704.

[16] 李静静,陈健,朱金玲. 基于 DEM 的河流长度尺度转换与不确定性分析[J]. 人民长江,2010,48(8):56-58.

[17] 杨邦,任立良,王贵作,等. 基于尺度转换的数字水系提取方法及应用[J]. 中山大学学报(自然科学版),2009, 48(4):101-106.

[18] 田丰,秦奋. 基于 LRIS-3D 建立高分辨率 DEM 的方法及对比研究[J]. 地理空间信息,2008,6(1):80-82.

[19] 姚文艺,陈界仁,秦奋. 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型研究[J]. 水土保持学报,2008,22(4):21-26.

[20] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 第 2 版. 北京:科学出版社,2012:429-456.

[21] 陈俊明,林广发,杨志海,等. 数字河网提取的影响参数优化分析[J]. 地球信息科学学报,2011,13(1):32-37.

[22] 孙玉柱,郑粉莉,张姣. 基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J]. 水土保持通报,2014,21(3): 20-24.

[23] Li T,Gao Y. Runoff and sediment yield variations in response to precipitation changes: A case study of Xi-chuan watershed in the Loess Plateau, China[J]. Water,2015,7(10):5638-5656.

[24] 卜耀军,朱清科,包耀贤,等. 陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J]. 水土保持学报,2014,28 (3):153-157.