

# 基于同位素分析研究山东禹城夏玉米水分来源

张景文<sup>1</sup>, 陈报章<sup>2</sup>

(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2016年山东省禹城市夏玉米为研究对象, 通过测定分析不同生长期降水、土壤水、植物水、地下水、地表水的稳定氢氧同位素值, 并利用直接对比法和多元线性混合模型, 分析不同水源对夏玉米不同生长期贡献率, 进而研究其水分来源。结果表明: 禹城市大气降水线方程为  $\delta D = 7.80\delta^{18}O + 8.61$ , 其斜率和截距均小于全球大气降水线方程, 表明降水在降落过程存在蒸发富集过程。夏玉米不同生长期水分来源存在差异, 出苗期由于土壤含水量较低, 植物主要利用浅层地下水且利用率为89.6%; 拔节期降雨量丰富, 夏玉米主要利用0—10 cm表层土壤水, 利用率为85.8%; 抽穗期夏玉米主要利用10—60 cm土壤水, 利用率达62.9%; 生长到灌浆期, 根系分布在较深土层且20—100 cm土壤含水量稳定, 夏玉米主要利用20—100 cm土壤水, 利用率为69.7%; 成熟期植物主要利用大于60 cm的深层土壤水, 利用率达96.1%, 此时土壤含水量较低且根系分布可达深层土壤。

**关键词:** 夏玉米; 稳定氢氧同位素; 水分来源

**中图分类号:** S273.4; S513

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2017)04-0099-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.017

## Isotope Analysis of Water Sources of Summer Corn in Yucheng of Shandong

ZHANG Jingwen<sup>1</sup>, CHEN Baozhang<sup>2</sup>

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

2. Institute of Geographical Science and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract:** In this study, we used hydrogen and oxygen stable isotope tracer technique to determine the water isotopic compositions of precipitation, soil water, groundwater, surface water and xylem water for summer corn during the growing season in 2016 in Yucheng, Shandong Province. Both direct inference approach and multi-source linear mixed models (Iso-Source) were applied to estimate the sources of root water uptake and their contributions in different growing seasons of summer corn. The results showed that the linear model of precipitation was  $\delta D = 7.80\delta^{18}O + 8.61$  for Yucheng, and the intercept and slope were less than the values of global precipitation model due to evaporation. Summer corn mainly used shallow groundwater during the seedling stage and the contribution was 89.6% due to the low soil moisture content. During the rainfall-abundant jointing stage, it mainly imbibed water from the 0—10 cm soil layer, and the contribution was 85.8%. During the heading stage, it mainly imbibed water from the 10—60 cm soil layer, and the contribution was 62.9%. The corn mainly used water from deeper soil layer during the filling stage (20—100 cm, 69.7%), because the root was in the deep soil layer and soil water content was stable. During the mature stage, it mainly imbibed water from the more than 60 cm soil layer with the low soil moisture content and the deep root, and the contribution was 96.1%.

**Keywords:** summer corn; the stable hydrogen and oxygen isotopes; water source

华北平原是我国粮食主产区之一, 农田水分状况是该区域作物产量主要限制性因素。因此如果水资源利用不合理, 对我国未来的粮食产量将造成巨大的影响。研究水文循环可以为合理利用水资源提供理论指导, 稳定性氢氧同位素技术的应用则为水文循环

研究提供了新的手段。在自然界中, 降水、地下水、土壤水和植物体内水分相互转化的水循环过程中, 同位素的分馏效应导致不同水体具有不同的同位素含量, 利用不同水体同位素含量之间的差异, 可研究它们之间的相互转化方式及转化量<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2017-02-28

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“中国涡度相关通量塔空间代表性评估与碳源/汇尺度扩展研究”(41271116); 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目“星—空—地多源碳排放监测数据的融合同化和系统集成研究”(O88RA901YA)

第一作者: 张景文(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: zhangjingwen188@yeah.net

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

目前,研究植物水分来源的方法很多,但是借助于稳定同位素技术分析植物水分来源是迄今为止较为可行的方法。研究表明,除少数耐盐碱和干旱地带植物外,绝大多数植物根系吸收水分后,植物体内茎木质部水分中稳定氢氧同位素的组成一般不会发生变化<sup>[2]</sup>,因此通过对比植物木质部水分与各潜在水源的同位素组分,可以区分植物对不同水源的相对使用量<sup>[3-4]</sup>。国内外对夏玉米水分来源的研究已有许多,如 Wu 等<sup>[5]</sup>通过选择性进行沟灌夏玉米,研究了其水分来源的变化特征,发现植物随着生长的进行,根系是往深层吸收土壤水,其中在干旱区域吸收深层土壤水,在沟灌条件下的湿润区域主要吸收浅层土壤水;Asbjornsen 等<sup>[6]</sup>研究了美国中西部地区夏玉米不同季节水分吸收深度,发现夏玉米主要吸收 20 cm 以上的土壤水;Wang 等<sup>[7]</sup>研究了陕西省夏玉米不同生长期植物水分来源,发现夏玉米主要吸水深度在 0—50 cm;王鹏等<sup>[8]</sup>研究了华北地区夏玉米耗水规律,发现在整个生长期存在着先由浅变深,后由深变浅的规律;王冰洋等<sup>[9]</sup>发现禹城市夏玉米生长期水分来源主要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等。但是基于同位素探究华北平原禹城市夏玉米降水—地下水—土壤水—植物水完整体系的研究少见报道。华北平原夏玉米耗水量一般与同期降水峰期相吻合,所以正常年份夏玉米生育期内基本不必灌溉,就可以满足作物生长需水。本文以 2016 年山东省禹城市夏玉米为研究对象,运用稳定性氢氧同位素技术,结合 IsoSource 模型,通过采集各潜在水源和植物样,探讨夏玉米水分来源,为制定合理的灌溉措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于山东省禹城市,东经 116°38′,北纬 36°57′,平均海拔高度约 20.0 m。地处黄河下游冲积平原,地势低平,土壤母质为河道冲积物,土壤质地以粉砂和轻壤为主。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均温度 13.1℃,年平均降水量 528 mm,降水分配极不均匀,春季 3—5 月仅占年降水量的 12% 左右,夏季 6—8 月约占全年降水的 60%。该区地下水埋深较浅,夏玉米生长季地下水埋深在 1.5~2.5 m 之间。种植制度以冬小麦—夏玉米一年两熟为主。

夏玉米品种为宇玉 30,6 月 22 日播种,9 月 28 日收获。在冬小麦收获后直接播种,其生育期内不灌溉。采用南北垄向种植方式,栽培垄距约 8 m,垄高约 18 cm,夏玉米平均行间距 70 cm。

### 1.2 样品采集

为研究农作物主要水分来源,本次试验从 2016

年 6 月至 10 月初在禹城试验站对降水、土壤水、农作物茎水、地下水和地表径流进行采样。

(1)降水样品的采集:在样地内多点布设自制的降水采样装置,每场降雨后立即进行雨水收集。将收集的降水样品放入 50 mL 塑料采样瓶中,并立即用 Parafilm 密封冷藏保存,以防止水分蒸发损失。

(2)土壤样品的采集:在夏玉米不同生育期内,出苗期(7 月 7 日)、拔节期(8 月 6 日)、抽穗期(8 月 21 日)、灌浆期(9 月 8 日)和成熟期(9 月 26 日),利用长 1 m 的土钻,分别在裸地处理和夏玉米样地中随机选 3 个采样点,作为 3 次重复,分别采集 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—80, 80—100 cm 不同土层的土壤样品。一部分用于土壤水分的分析,采样后立即密封自封袋,并放入保温箱中防止汽化,将样品带至实验室冷冻保存,以待提取土壤水;一部分装入铝盒中(3 次重复),在实验室利用烘干法测定土壤含水量。

(3)植物茎的采集方法为:选择长势良好且相似的 3 株夏玉米,每株采集一段约 10 cm 长接近根部的茎,剔除茎干外面的绿皮部分<sup>[7]</sup>,迅速装入采样瓶并用 Parafilm 密封冷藏,带回实验室后冷冻保存。夏玉米茎干的采样频率与土壤水相同。

(4)地下水和地表水的采集:地表水取自样地附近的河水,取样时先搅动表层水,以保证不同水层河水的均匀一致;地下水为试验站内井水,水深约 1.5~2.5 m。

### 1.3 室内分析

土壤水和植物茎干水采用低温真空冷凝法抽提,抽提装置为 LI-2000 植物土壤水分真空抽提系统,单次抽提率达 98% 以上,抽提出来的水分需满足最低量(0.5 mL)。提取出的水分与降水、地表水、地下水等样品测定采用 LGR 908-0008 液态水同位素分析仪,同位素  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的测定精度分别达到 0.3‰ 和 0.1‰,稳定同位素含量为与标准平均海洋水(V-SMOW)的千分比<sup>[10]</sup>。土壤含水量采用烘干法测定:将装有土样的铝盒用精度为 0.01 g 的电子天平称重(W1);打开盒盖后连同盒盖一起放入 105℃ 的烘箱烘干至恒重(W2),计算公式为:

土壤含水量 =  $(W1 - W2) / (W2 - W0) \times 100\%$   
式中:W0 为铝盒的重量。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水量的变化规律

夏玉米生育期内土壤含水量的变化主要受降雨量,气温和作物生长过程等方面影响。从图 1 可以看出,有作物生长的土壤含水量较低。通过 SPSS 19.0 软件分析,裸地和作物生长地的土壤含水量存在显著性差异。整体而言,随土壤深度的变化,土壤含水量的变化趋势

相似,在0—20 cm范围内土壤含水量变化较剧烈,蒸发作用较强;20 cm以下深度土壤含水量随深度增加变化较小,逐渐升高,受蒸发作用影响逐渐减小。从裸地处理和作物生长样地中土壤含水量随深度变化的情况可以看出,20—40 cm土层的含水量相对较低。

从图1b可以看出,7月7日土壤平均含水量为

22.90%,8月6日土壤平均含水量为25.84%,8月21日土壤平均含水量为28.63%,降雨主要集中于7—8月份,从7月初到8月底,土壤含水量呈现逐渐增加的趋势。8月底到9月份无降水,9月8日土壤平均含水量为22.15%,9月26日土壤平均含水量为18.90%,土壤水明显降低。

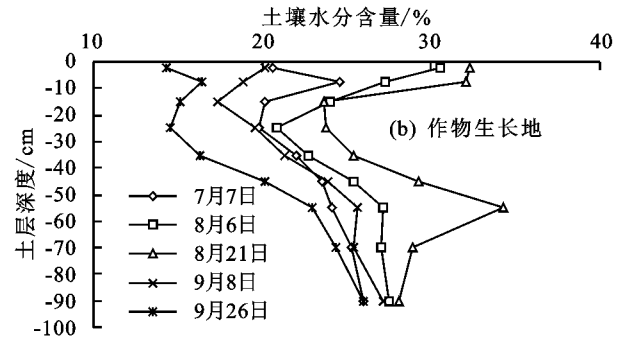
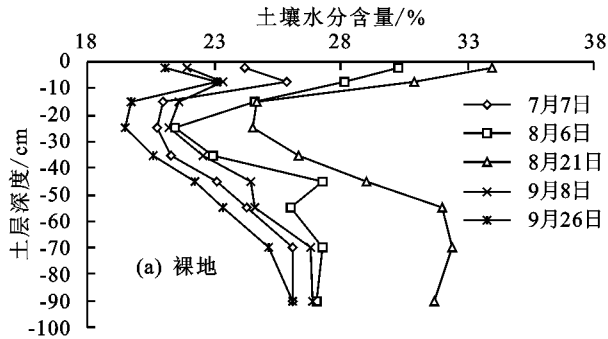


图1 2016年山东省禹城市夏玉米生育期裸地和作物生长地土壤水分含量变化

## 2.2 降水量、温度和降水稳定同位素的变化特征

2016年6月到11月底,降雨较多,可以满足夏玉米生长的需要。在众多影响降水同位素变化的气象因子中,温度效应和降水量效应的重要性尤为突出,这是因为同位素的分馏作用主要受制于相变过程

中的温度<sup>[11]</sup>。降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系叫做温度效应,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈负相关关系时说明存在降水量效应。2016年禹城市降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和温度及降水量的关系散点图(图2)可以看出,当地存在降水量效应,没有明显的温度效应。

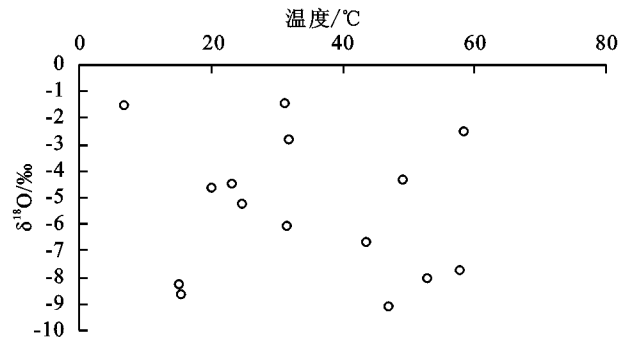
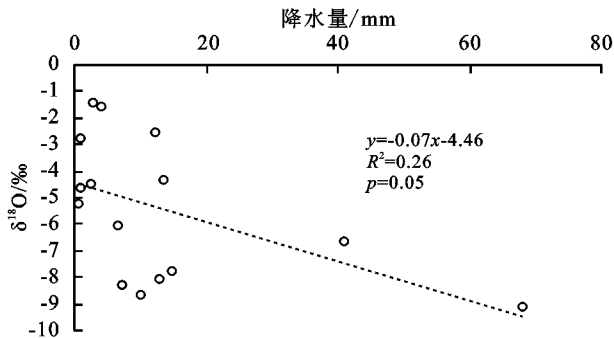


图2 2016年山东省禹城市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量和温度的关系

## 2.3 植物水及各水源稳定氢氧同位素组成特征

图3为2016年禹城试验站收集的降水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta D$ 建立的大气降水线, $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 $-9.11\text{‰} \sim -1.41\text{‰}$ ,平均值为 $-5.90\text{‰}$ ;  $\delta D$ 的变化范围为 $-67.47\text{‰} \sim -12.51\text{‰}$ ,平均值为 $-37.41\text{‰}$ 。根据降水样品的同位素值,得出当地大气降水线方程为 $\delta D = 7.80\delta^{18}\text{O} + 8.61$  ( $R^2 = 0.91, p < 0.001$ )。其斜率和截距均小于全球大气降水线方程( $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ )<sup>[12]</sup>,由于在瑞利平衡条件下, $D$ 的分馏效应为 $^{18}\text{O}$ 分馏效应的8倍,温度越低,分馏效应之比越大<sup>[13]</sup>,表明了降水存在蒸发富集过程<sup>[14]</sup>。

夏玉米样地附近1 km左右,其他不同水源稳定氢氧同位素值大部分在当地大气降水线的下方,表明雨滴在降落到地面后,受到了蒸发作用的影响。河水样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 的值的范围为 $-7.89\text{‰} \sim -4.16\text{‰}$ , $\delta D$ 的变化范围为 $-55.91\text{‰} \sim -35.76\text{‰}$ ,平均值分别为 $-6.15\text{‰}$ 和 $-48.00\text{‰}$ ,处于大气降水的范围里,反映了在空旷

的水面使得降水发生了强烈的蒸发;地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-9.17\text{‰} \sim -3.32\text{‰}$ , $\delta D$ 的变化范围为 $-66.97\text{‰} \sim -32.06\text{‰}$ ,平均值分别为 $-7.70\text{‰}$ 和 $-57.00\text{‰}$ ,其样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值没有落在降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的区间,因为地下水是多年形成的,更新较慢,且比较稳定,受短时降雨影响较小。植物木质部茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-11.27\text{‰} \sim -3.81\text{‰}$ , $\delta D$ 的变化范围为 $-83.14\text{‰} \sim -48.96\text{‰}$ ,平均值分别为 $-9.07\text{‰}$ 和 $-72.76\text{‰}$ ;土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-11.70\text{‰} \sim -5.36\text{‰}$ , $\delta D$ 的变化范围为 $-90.90\text{‰} \sim -46.14\text{‰}$ ,平均值分别为 $-9.25\text{‰}$ 和 $-68.48\text{‰}$ ,值均较小。

在夏玉米不同生长期,通过对不同处理条件土壤中稳定氢氧同位素的分析(图4),发现裸土处理条件下,土壤水样品 $\delta D$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系为 $\delta D = 5.47\delta^{18}\text{O} - 16.00$  ( $R^2 = 0.90, p < 0.001$ );夏玉米作物生长样地中,土壤水样品 $\delta D$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系为 $\delta D = 5.68\delta^{18}\text{O} - 14.32$  ( $R^2 = 0.82, p < 0.001$ )。通过SPSS 19.0软件分析,

裸地和作物生长样地不同处理条件下,  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  之间差异显著。

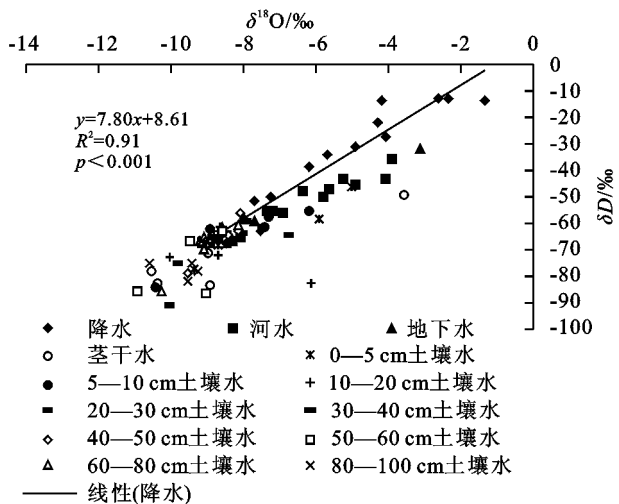


图 3 2016 年山东省禹城市植物水与  
各水源  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系

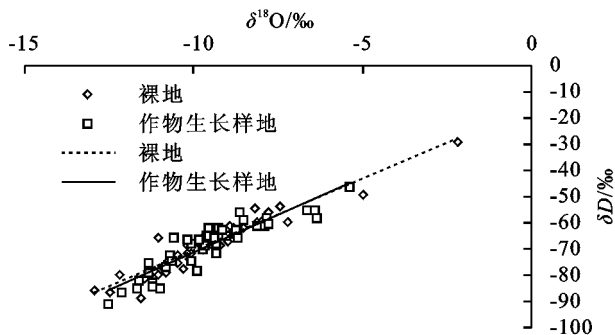


图 4 2016 年山东省禹城市不同处理条件下  
土壤中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系

## 2.4 植物茎干水分的同位素特征

植物体中氢和氧元素在很大程度上依赖于水,特别是氢几乎全部来源于水。降水只有转化为土壤水,才能被植物利用,根据采集的土壤和植物茎干样品同位素组成,采用直接对比法,初步得出夏玉米在不同生长期的主要水分来源<sup>[15]</sup>。

对比夏玉米不同生长期的植物木质部水和土壤水的同位素特征,发现在不同生长期,植物的水分来源存在差异。从图 5 可以看出,在出苗期,植物茎干水与土壤水无交叉点,没有显示利用任何土层的水分,但是与地下水的  $\delta^{18}O$  值接近,可能由于夏玉米出苗期土壤含水量较低,前期的大气降水转化为地下水为植物幼苗生长提供了水源<sup>[16]</sup>。在拔节期,从植物茎干水中  $\delta^{18}O$  值可以看出,夏玉米茎干水的  $\delta^{18}O$  值与土壤水在 5—10, 10—20 cm 处各有一个交点,说明夏玉米可能吸收利用 0—20 cm 土层的水分。当植物生长到抽穗期,植物茎干水与土壤水在 10—20, 20—30 cm 有交点,说明夏玉米可能吸收利用了 10—30 cm 土壤水。在灌浆期,植物茎干水与 20—30, 30—40, 50—60 cm 3 个土层水分均有交点,说明夏玉米

可能对这 3 层的土壤水均有吸收利用。当植物生长到成熟期,植物茎干水与 80—100 cm 土壤水有一个交点,说明夏玉米可能利用 80—100 cm 相对较深层的土壤水。

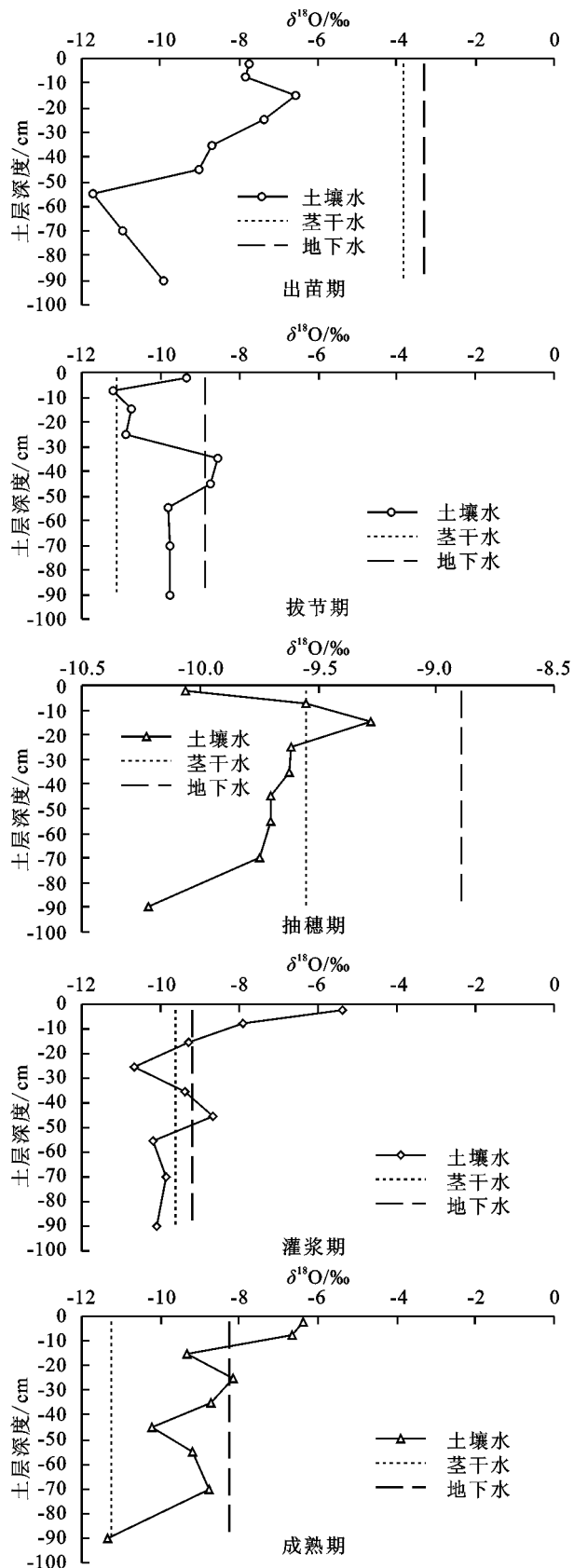


图 5 山东省禹城市 2016 年夏玉米各生长期  
茎干水的  $\delta^{18}O$  特征与潜在水源的关系

2.5 植物水分来源的变化特征

从图 5 可以看出,通过直接对比法初步得出了夏玉米水分来源的范围,然而结果出现没有吸收水分来源和多个吸收层次的情况,为了更准确判断夏玉米的主要水分来源和吸水深度,利用多元线性混合模型(IsoSource),将增量设为 1%,容差设为 0.01,计算出各潜在水源对植物的贡献率。通常情况下,氢同位素的分馏效应较大,氧同位素变化较稳定,因此采用  $\delta^{18}\text{O}$  来计算不同水源对植物的贡献率。

表 1 2016 年山东省禹城市夏玉米不同生长期各潜在水源对植物的平均贡献率

生长期	各潜在水源对夏玉米的平均贡献率/%						
	地下水	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—60 cm	>60 cm
出苗期	89.6	1.9	2.8	2.1	1.5	1.0	1.0
拔节期	0.6	85.8	4.5	6.6	0.5	0.8	1.2
抽穗期	12.5	13.3	16.2	16.0	15.9	14.8	11.4
灌浆期	12.4	4.4	13.4	20.5	14.3	14.8	20.1
成熟期	0.4	0.1	0.8	0.4	0.5	1.7	96.1

3 讨论

2016 年禹城试验站夏玉米生育期为从 6 月底到 9 月底,处于当地雨季,因此在试验田中不实施灌溉,所需水分主要来源于降雨。其生育期内的土壤水分状况主要由播种期土壤初始含水量和生长期内的降雨量所决定<sup>[17]</sup>。当地 8 月份雨季降水量较多,土壤含水量相对较高,也有效说明了降水对土壤的补给作用。因为土壤含水量的变化主要受降雨量、温度和作物生长过程影响,有作物生长的土壤含水量较低,证实了作物耗水的现象。国内一些研究结果表明土壤平均入渗率与土壤含水率呈负相关的线性关系<sup>[18]</sup>,照此推测 20—40 cm 应该有较大的平均入渗速率。夏玉米生育期内降雨量多的时期,土壤含水量增加,降雨量少的阶段,土壤水分明显降低,特别是成熟期大气降水减少,植物根系开始大量吸水,并随着植物叶片的蒸腾量上升,致使土壤水分被大量消耗。

禹城市存在降水量效应,没有明显的温度效应。而降水量效应中相关系数不大的原因在于当地雨季连续性的降水较多,这种情况下一般只收集一次,且整个时间尺度不长。而王冰洋等<sup>[9]</sup>在研究禹城市大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  和降水量的关系中也得到相同的结果。在夏玉米不同生长期,通过对不同处理条件土壤中稳定氢氧同位素的分析,发现裸土处理和作物生长条件下,两条趋势线斜率和截距均低于当地大气降水线,说明降水到达地面后发生了蒸发富集;裸土处理条件下斜率和截距与作物生长条件下同样存在差异,且两种处理的  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值均差异显著,裸地土壤水同位素趋势线位于夏玉米生长条件下趋势线的

2016 年山东省禹城市夏玉米在不同生长期水分来源存在差异。从表 1 可以看出,7 月初夏玉米出苗期主要吸收利用浅层地下水,且对夏玉米的贡献率为 89.6%,对各层土壤水的利用比例大致相同;拔节期是 8 月初,植物主要利用 0—10 cm 土层土壤水,利用率为 85.8%;抽穗期夏玉米主要利用 10—60 cm 土壤水,利用率达 62.9%;灌浆期植物主要吸收利用 20—100 cm 土壤水,利用率为 69.7%;成熟期,夏玉米主要利用大于 60 cm 的土壤水,贡献率达 96.1%。

下方,说明作物的覆盖减少了土壤水分的蒸发,对于涵养水源具有重要意义。

通过直接对比法和多元线性混合模型结合的方法,发现两种方法得出的结果是相似的,对比夏玉米不同生长期的植物木质部水和各潜在水源的同位素特征,发现 2016 年山东省禹城市夏玉米在不同生长期由于土壤含水量和根系分布不同,水分来源存在差异。而且研究发现直接对比法对于潜在水源较多时,存在缺点,不能更好地判断主要水分来源和定量分析各水源贡献率。夏玉米出苗期土壤含水量较低,当地温度较高,表层土壤蒸发强烈,此时期夏玉米根量较少且主要分布在表层,由于采样前期有降水,所以降雨转化成的浅层地下水为其主要水分来源。拔节期为 8 月初,大气降水较多,土壤水分得到补给,主根系主要分布在 0—10 cm,夏玉米主要利用 0—10 cm 表层土壤水。抽穗期夏玉米主要利用 10—60 cm 土壤水;灌浆期植物主要利用 20—100 cm 土壤水,此生长期土壤含水量在 20—100 cm 变化较稳定,抽穗期和灌浆期夏玉米根系生长较发达,所以利用土壤水范围较广。成熟期,植物根系分布达到较深土层,且 9 月份降水较少,土壤含水量较低,植物主要利用大于 60 cm 的土壤水。2016 年与 2015 年<sup>[9]</sup>禹城市夏玉米生长期水分来源在出苗期和拔节期存在差异,抽穗期、灌浆期和成熟期基本相似。通过分析 2016 年禹城试验站夏玉米生育期内降水、地下水、土壤水和植物水的稳定氢氧同位素值,发现了不同水源之间的转化规律,对于农田水资源的合理利用具有重要意义。

4 结论

基于稳定氢氧同位素技术,本研究分析了 2016

年华北平原禹城综合试验站夏玉米在不同生育期内水分来源的差异,利用直接对比法和 IsoSource 多元线性混合模型,计算了夏玉米对不同水源的利用比例。主要结论为:

(1)2016 年山东省禹城市大气降水线方程为: $\delta D = 7.80\delta^{18}O + 8.61$  ( $R^2 = 0.91$ )。其斜率和截距均小于全球大气降水线方程,表明了降雨水源在降落过程存在蒸发富集过程。夏玉米样地附近其他不同水源的氢氧同位素值大部分在当地大气降水线的下方,表明雨滴在降落到地面后,受到了蒸发作用的影响,且夏玉米生育期内降雨过程存在降水量效应。

(2)夏玉米生育期内,裸土处理时土壤水样品  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系为: $\delta D = 5.47\delta^{18}O - 16.00$ ;作物生长样地中,土壤水样品  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系为: $\delta D = 5.68\delta^{18}O - 14.32$ ,裸土处理时趋势线位于夏玉米作物生长条件趋势线的下方,说明作物的覆盖减少了土壤水分的蒸发。

(3)2016 年禹城市夏玉米在不同生长期水分利用情况不同。出苗期主要利用浅层地下水且利用率为 89.6%;拔节期植物主要利用 0—10 cm 土层土壤水,利用率为 85.8%;抽穗期夏玉米主要利用 10—60 cm 土壤水,利用率达 62.9%;灌浆期植物主要利用 20—100 cm 土壤水,利用率为 69.7%;成熟期植物主要利用大于 60 cm 的土壤水,利用率达 96.1%。

#### 参考文献:

- [1] 张应华,作彦卿,温小虎,等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展,2006,17(5):738-747.
- [2] Wershaw R L, Friedman I, Heller S J. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees[C]//Hobson F, Speers M, eds. *Advances in Organic Geochemistry*. New York: Pergamon,1966:55-67.
- [3] 贾国栋,余新晓,邓文平,等. 北京山区典型树种土壤水分利用特征[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(3):403-411.
- [4] 巩国丽,陈辉,段德玉. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较[J]. 生态学报,2011,31(24):7533-7541.
- [5] Wu Y J, Du T S, Li F S, et al. Quantification of maize

- water uptake from different layers and root zones under alternate furrow irrigation using stable oxygen isotope[J]. *Agricultural Water Management*,2016,168(C):35-44.
- [6] Asbjornsen H., Shepherd G., Helmers M., et al. Seasonal patterns in depth of water uptake under contrasting annual and perennial systems in the Corn Belt Region of the Midwestern U. S. [J]. *Plant Soil*,2008,308(1):69-92.
- [7] 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.
- [8] 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):481-490.
- [9] 王冰洋,陈报章,孙少波,等. 山东省禹城市夏玉米生长期水分利用特征分析[J]. 水土保持学报,2016,30(6):153-161.
- [10] 刘自强,余新晓,贾国栋,等. 北京山区侧柏和栓皮栎的水分利用特征[J]. 林业科学,2016,52(9):22-30.
- [11] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 中国东部季风区大气降水  $\delta^{18}O$  的特征及水汽来源[J]. 科学通报,2009,54(22):3521-3531.
- [12] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*,1961,133(3465):1702-1703.
- [13] 李广,章新平,张立峰,等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. 环境科学,2015,36(6):2094-2101.
- [14] 朱建佳,陈辉,邢星,等. 柴达木盆地荒漠化植物水分来源定量研究:以格尔木样区为例[J]. 地理研究,2015,34(2):285-292.
- [15] 邓文平,余新晓,贾国栋,等. 利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(3):412-421.
- [16] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, et al. Dynamics of water uptake by maize on sloping farmland in a shallow Entisol in Southwest China[J]. *Catena*,2016,147(120):511-521.
- [17] 王晶晶. 土壤作物系统中水分及其氢氧稳定同位素的动态与农田耗水特征[D]. 北京:中国农业大学,2015.
- [18] 贾志军,王贵平,李俊义,等. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究[J]. 中国水土保持,1987(9):25-27.