

# 半干旱区玉米水分利用策略时空分布特征——以通辽平原为例

张洁

延安大学建筑工程学院

DOI:10.32629/as.v9i2.3756

**[摘要]** 探索我国半干旱区通辽平原主要农作物玉米的水分利用特征,可为区域水资源的管理与粮食安全提供保障提供参考。运用氢氧稳定同位素技术,测定了研究区农作物玉米2022年生长季的植物水及其所在区域的灌溉水、降水与不同深度土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 组成,并结合直接对比法,定性分析了农作物水分利用策略。

**[关键词]** 同位素; 水分来源; 玉米; 通辽平原

**中图分类号:** S435.131 **文献标识码:** A

## Water use characteristics of maize during the growing season in semi-arid areas

Jie Zhang

School of Architecture and Engineering, Yan'an University

**[Abstract]** Exploring the water use characteristics of maize, a major crop in the semi-arid Tongliao Plain of China, can provide reference for regional water resource management and food security. The stable isotope technology of hydrogen and oxygen was used to determine the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  composition of plant water, irrigation water, precipitation, and soil water at different depths in the 2022 growing season of maize in the study area. Combined with direct comparison method, the water use strategy of crops was qualitatively analyzed.

**[Key words]** Isotopes; Water source; Maize; Tongliao Plain

### 引言

变化环境下水资源改变对人类生存发展至关重要。我国北方半干旱地区受季风气候与人类活动影响,农作物生长常因水资源时空分配不均而水分供应不足,影响产量<sup>[1]</sup>。因此,了解农作物水分利用特征对合理利用水资源及增产有意义。目前,基于氢氧稳定同位素分馏原理的技术体系,是植物水分生理生态研究的核心方法<sup>[2]</sup>。

位于我国北方的通辽市,盛产玉米在内的各种作物,其中玉米产量独占鳌头。通辽市地处半干旱地带,水资源是制约通辽市农业经济发展的主要因素。本研究通过野外调查取样与实验室测试分析,系统解析不同水体(如雨水、灌溉水、作物水、土壤水)的氢氧同位素特征,并探究植被(重点为玉米)的水分利用特征。结合生长季玉米的水分利用策略分析,旨在为区域水资源高效利用与粮食安全提供科学依据,支撑农业可持续发展。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验地概况

试验于2022年8月在通辽市科尔沁区试验站开展,地理坐标为北纬 $43^{\circ}22' \sim 43^{\circ}58'$ ,东经 $121^{\circ}42' \sim 123^{\circ}02'$ 之间,是松辽平原西部边缘。区域年降水量变化范围为 $200 \sim 400$  mm,

年内分配差异性显著,春季降雨量仅占全年的13%,而夏季降雨占全年的69%。区域地表水资源匮乏,灌溉用水以地下水为主。

#### 1.2 测定指标与方法

聚焦对水分敏感的关键物候期(2022年8月:抽雄-灌浆期),此时灌溉效应与同位素分馏最显著,分别于灌溉前后,共计两次对研究区试验地各水源进行对比采样。

作物水采集:在研究区试验地选择 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的大样方,随机选取(间距尽量扩大具有代表性)长势均匀的3株玉米,采集基茎5 cm以下的茎干进行取样。

土壤水采集:沿垄宽方向,在植株两侧等距离各取一个点,由于玉米根系较长,沿垂直方向分别取20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm、120 cm、140 cm、160 cm、180 cm及200 cm处的土壤样品。

雨水采集:在气象站内放置降雨收集装置,每次降雨事件结束后,立刻收集雨水。灌溉水采集:在抽水灌溉前,用抽水泵将井内水排出30 min,待稳定后进行取水。

共采集水样26个,其中土壤水样20个,灌溉水样2个,植被水样2个,雨水样2个。所有样品均使用100 mL细口聚乙烯瓶中密封保存,采集后及时运送至实验室并储存于冷冻环境( $-18^{\circ}\text{C}$ )中。

实验室使用LI-2100全自动真空冷凝抽提系统对解冻后样品的水分进行低温真空抽提,并经过0.22 μm有机质滤头过滤后,装入1.5 mL的自动进样瓶中加盖密封冷藏于低温环境(3~5℃)中待测。使用PicarroL2130-i激光同位素分析仪测定氢氧同位素组成,计算公式如下:

$$\delta_{\text{sample}} = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000\text{‰}$$

式中,  $R_{\text{sample}}$ 和 $R_{\text{standard}}$ 分别为水样和VSMOW标样中重同位素与轻同位素的比值,  $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 分别为 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 地区大气降水线

通过全球降水同位素监测网(GNIP)数据支持,采用距离研究区最近的锦州站点降水同位素观测资料,建立当地大气降水线(LMWL),并基于此开展分析工作。锦州距离本文研究区约为295 km,同属西辽河流域,地处半干旱区农牧交错带,地理位置与气候条件因素等相似,可采用锦州市的当地大气降水线为参考,不影响结果分析的准确性。

锦州站地理坐标为北纬41.13°,东经121.10°之间,海拔66 m,数据采集时间为1986-1989年。建立锦州地区大气降水线方程(1):

$$\delta\text{D} = 5.75\delta^{18}\text{O} - 11.40\text{‰} \quad (R^2 = 0.796)$$

从图1可以看出,锦州地区大气降水线落在了GMWL的下方,该区LMWL的斜率和截距偏离全球的平均水平。与相近地区通辽市科尔沁左翼中旗当地大气降水线:  $\delta\text{D} = 6.69\delta^{18}\text{O} - 2.93\text{‰}$ <sup>[3]</sup>比较发现,两条降水线斜率均小于8,表现出我国东北部降水特点具有一定的相似性,表明该地区均受到一定程度的蒸发影响;同时,锦州地区的降水线斜率小于科尔沁左翼中旗的,其原因可能是后者为研究者实地采集2017~2019年间夏季6-8月的8个数据,与本文数据源及时间序列不同,因此与本文结果存在一定的差异性;再者,科尔沁左翼中旗与锦州市同属东亚夏季风区,但影响氢氧同位素的降水及气温存在一定差异,即锦州市的6-8月降水量及气温均高于科尔沁左翼中旗<sup>[3]</sup>,即能够体现出影响大气降水同位素组成因素中的“温度效应”与“雨量效应”。

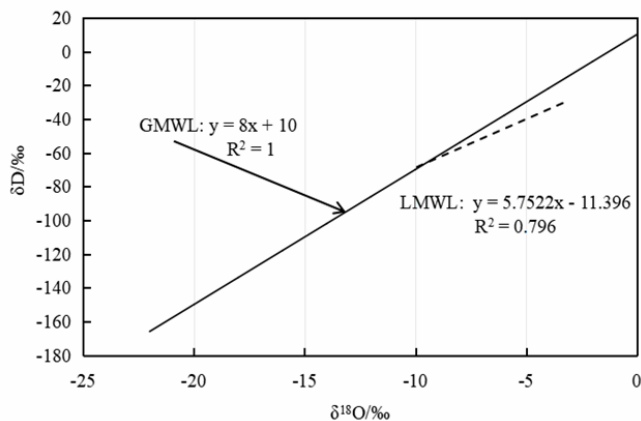


图1 锦州地区大气降水线

### 2.2 各水源氢氧同位素变化

根据作物生长期试验地各水源(雨水、灌溉水、作物水、土壤水)氢氧同位素关系(图2)可以看出,作物水、雨水、灌溉水及大部分土壤水的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 位于LMWL下侧,少部分土壤水(灌溉前20 cm,灌溉前60 cm,灌溉前120 cm,灌溉前180 cm,灌溉后20 cm)的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 位于LMWL上。由于土壤水直接或间接地接受蒸发效应后的大气降水补给,因此,可将土壤水视为研究区的特征地表水体。通过对研究区试验地土壤水氢氧同位素进行回归拟合分析(灌后160 cm的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在异常,对拟合结果影响显著,经分析可能为样品在运输等过程中存在密闭性不足等问题,故判定为异常点,不参与以下各项分析),得到地区蒸发趋势线方程EL为:

$$\delta\text{D} = 3.89\delta^{18}\text{O} - 38.38\text{‰} \quad (R^2 = 0.80)$$

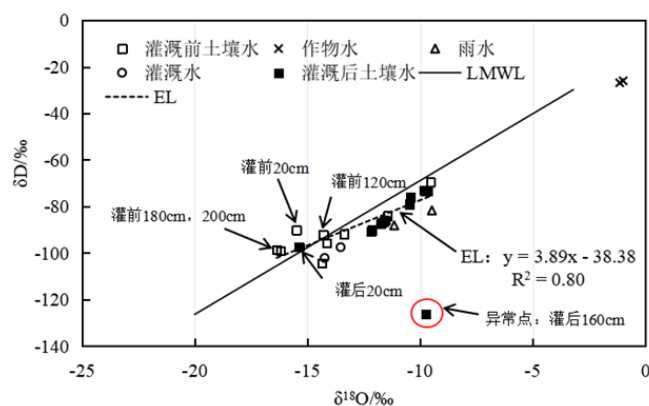


图2 研究区试验地各水源氢氧同位素关系

研究区当地蒸发线EL具有较低的斜率,且与LMWL相交,这种现象在半干旱地区中经常出现,水样落在蒸发趋势线上不同位置,反映了不同水体受到的蒸发程度存在差异。其中,灌溉水与降水水样均分布在EL与LMWL下方且距离相似,可确定灌溉水的主要补给源为降水,且降水在降落过程中存在一定的蒸发现象。灌溉水(灌溉前40 cm,灌溉后100 cm,灌溉后180 cm,灌溉后200 cm)位于EL与LMWL之间,说明受降水与蒸发综合影响。

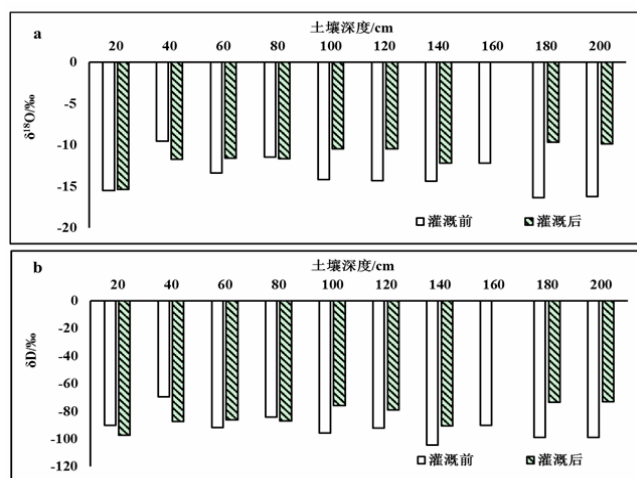


图3 研究区试验地灌溉前后土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 变化对照

### 2.3 浅埋滴灌条件下灌水前后土壤水同位素变化分析

为进一步分析浅埋滴灌条件下土壤水同位素变化情况,在浅埋滴灌场景下,单次灌水前后不同深度土壤水同位素的变化情况被系统采集,并通过线性模型进行量化,分析结果见图3。不同深度土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  稳定同位素变化趋势相似,均呈波动变化趋势,而不是简单随土层深度增加减弱或升高。土层深度 0-40 cm 处土壤灌水后  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  稳定同位素大于灌水前的值。土层深度 80 cm 处土壤稳定同位素具有相似特征。其余土层深度处土壤灌水后  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  稳定同位素均小于灌水前的值。

### 3 讨论

对研究区试验站各水源氢氧同位素关系分析(图2)表明,作物水、雨水、灌溉水及大部分土壤水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  位于 LMWL 下侧,说明研究区气候使各水源受强烈蒸发影响,导致同位素过度分馏,符合通辽半干旱地区蒸发量大于降雨量的事实。少部分土壤水(灌溉前后不同深度)的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  位于 LMWL 上,可能主要受大气降水影响。由图3可知,不同深度土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  变化趋势相似,呈波动变化。0-40 cm 及 80 cm 土层灌水后同位素值增大,说明蒸发强烈,同位素聚集;其他土层灌水后同位素值减小,存在贫化现象。生长季内,有效降水及灌溉使土壤水含量增加,0-40 cm 土层含水率及同位素值变化大,受外界影响大;深层土壤含水率变化小,同位素值稳定,受蒸发及植物消耗影响小,  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  逐渐贫化,说明灌溉水可能补给了深层土壤水。

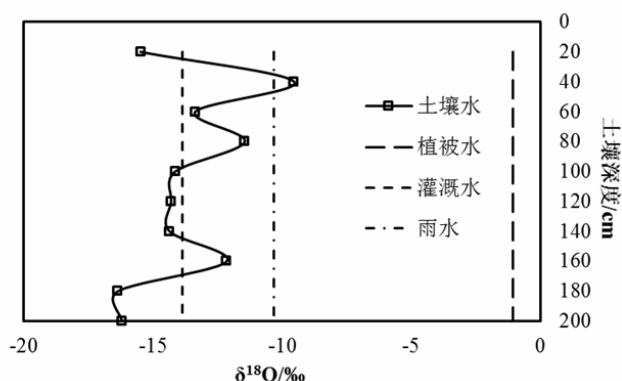


图4 研究区试验地不同土壤深度各水样的  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值

在半干旱地区,水分是影响植物生长的关键因子。降水及灌溉水进入土壤后,部分蒸发、部分被植物吸收利用、部分下渗。植物通过蒸腾作用将根系吸收的水分运输到叶片并散出。从图4

可知,试验地8月植物水与任何水源无交点,但40 cm、80 cm和160 cm处土壤水的  $\delta^{18}O$  值与植物水相近,说明茎干水可能主要来自土壤水,该结果与贺超等<sup>[4]</sup>研究结论相似。这可能是由于8月降水少、土壤温度高、蒸发强,深层土壤水可能被地下水补给,浅层土壤水充足时植被优先利用。植物根系是影响水分利用策略的重要因素,氢氧同位素示踪技术适用于定量区分植物水分来源。杨永辉等<sup>[5]</sup>研究发现滴灌更利于促进根系对40 cm以下土层水分的利用。本研究中玉米根系强大,主体分布在0-40 cm土层,后期可深入180 cm处,因此玉米在生长季各生育期的水分利用策略存在差异性,水分来源不统一。

### 4 结论

研究区大气降水方程为  $\delta D = 5.75 \delta^{18}O - 11.40\%$  ( $R^2 = 0.796$ ), 斜率小、截距高,表明该地区蒸发、水汽再循环强烈,且受东亚夏季风影响,能体现“温度效应”与“雨量效应”。地区蒸发趋势线在当地大气降水方程线下方,斜率更小,说明土壤水分受二次蒸发影响,与当地气候特点相符。灌水前后,土壤水氢氧稳定同位素值随深度波动,表层富集,深层灌水后贫化。试验地玉米生长季能利用不同深度土壤水,采用“浅层优先-深层调节”的用水策略。

### [参考文献]

- [1] Cabral A B, Miguei N F, De P R O, et al. Comparative analysis of spectral indexes for soil salinity mapping in irrigated areas in a semi-arid region, Brazil[J]. Journal of Arid Environments, 2023, 209.
- [2] 李雅琴, 李发东, 张秋英. 玛纳斯河流域土壤水稳定同位素特征及运移机制[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 690-697.
- [3] 郭鑫, 李文宝, 杜蕾, 等. 内蒙古夏季大气降水同位素特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(03): 1088-1096.
- [4] 贺超, 刘廷奎, 段利民, 等. 科尔沁沙地差巴嘎蒿(Artemisia halodendron)水分利用特征[J]. 中国沙漠, 2022(004): 042.
- [5] 杨永辉, 邬佳宾, 武继承, 等. 不同灌溉方式氢、氧同位素分布与夏玉米水分利用特征[J]. 节水灌溉, 2023(01): 71-77+85.

### 作者简介:

张洁(1984—),女,汉族,内蒙古自治区乌兰察布市人,硕士,助理实验师,研究方向:农业水资源利用与保护研究方向。