DOI: 10.5846/stxb201802250384

杜俊杉,马英,胡晓农,童菊秀,张宝忠,孙宁霞,高光耀.基于双稳定同位素和 MixSIAR 模型的冬小麦根系吸水来源研究.生态学报,2018,38(18):

作者.Applying dual stable isotopes and a MixSIAR model to determine root water uptake of winter wheat.Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

基于双稳定同位素和 MixSIAR 模型的冬小麦根系吸 水来源研究

杜俊杉1,马 英^{2,*},胡晓农1,童菊秀1,张宝忠3,孙宁霞1,高光耀4

1 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083

2 中国科学院地理科学与资源研究所,陆地水循环及地表过程院重点实验室,北京 100101

3 中国水利水电科学研究院,流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038

4 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

摘要:灌溉和施肥措施对农田水文循环具有重要影响,根系吸水是联系植物蒸腾和土壤水分运动的关键水文过程,定量识别灌溉施肥影响下作物根系吸水来源对农业用水优化管理具有重要意义。氘氧稳定同位素(D和¹⁸O)是追溯农田水分运移过程的理想天然示踪剂。基于 2013—2015 年北京市典型农田不同灌溉施肥处理冬小麦水分运移试验,利用 D和¹⁸O 双稳定同位素和MixSIAR 贝叶斯混合模型,量化冬小麦主要根系吸水深度及其贡献比例,阐明作物水分来源的季节变化及不同处理间的差异,分析根系吸水与土壤水分分布变化的相互关系。研究结果表明:两季冬小麦返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆和灌浆-收获期主要根系吸水深度均值分别为 0—20 cm(67.0%)、20—70 cm(42.0%)、0—20 cm(38.7%)和 20—70 cm(34.9%),但季节变化差异显著,2014季主要吸水深度随作物的生长发育而逐渐增加,2015季则主要集中于浅层土壤(0—70 cm)。返青-抽穗期仅灌水 20 mm 或施肥 105 kg/hm² N 促使拔节-抽穗期深层(70—200 cm)土壤水分利用率平均增加 29%,而前期充分灌水且大量施肥(≥当地施肥量 210 kg hm⁻²N)时拔节-抽穗期根系吸水深度为土壤表层 0—20 cm。在干旱少雨的冬小麦生长季内作物吸水来源与土壤水分消耗变化基本一致。

关键词:双稳定同位素;根系吸水;MixSIAR 模型;灌溉施肥处理;冬小麦

Applying dual stable isotopes and a MixSIAR model to determine root water uptake of winter wheat

DU Junshan¹, MA Ying^{2,*}, HU Xiaonong¹, TONG Juxiu², ZHANG Baozhong³, SUN Ningxia¹, GAO Guangyao⁴ 1 School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

- 2 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
- 3 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China
- 4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Irrigation and fertilization scheduling significantly affect field water cycles. Root water uptake is the critical process that connects plant transpiration and soil water movements. It is necessary to quantify the crop water uptake sources under different irrigation and fertilization treatments for optimizing agricultural water management. The stable water isotopes

收稿日期:2018-02-22; 修订日期:2018-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41671027,41730749)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: maying@igsnrr.ac.cn

of D and ¹⁸O are considered as ideal (natural) tracers for tracking water through the soil based on distinct isotopic signatures of water fluxes. The MixSIAR framework is the latest Bayesian stable isotope analysis mixing model in R that considers multiple sources of uncertainty and provides definite proportions of source contributions. In this study, dual stable isotopes of soil water and stem water were applied to determine seasonal water uptake patterns of winter wheat under different irrigation and fertilization treatments during 2013-2015 in Beijing, China. The contributions of the soil water at each depth to water uptake were quantified using the MixSIAR Bayesian mixing model. The direct inference method was also used to detect the potential root water uptake depth. Correlations between the water uptake patterns and soil moisture changes were further evaluated. The average contribution of soil water in the 0-20, 20-70, 70-150, and 150-200 cm layers was 35.6%, 27.6%, 23.1%, and 13.7%, respectively. The primary root water uptake depth was 0-20 cm (67. 0%), 20-70 cm (42.0%), 0-20 cm (38.7%), and 20-70 cm (34.9%) during the greening-jointing, jointingheading, heading-filling, and filling-harvest periods, respectively. Significant differences in crop water use appeared between the 2014 and 2015 growing seasons. The main root water uptake depth gradually increased from 0-20 cm (greening-jointing period) to 70-150 cm (heading-filling period) and was maintained at the 70-150 cm depth until the filling-harvest period in the 2014 season. However, winter wheat mainly took up soil water from the shallow layers (0-70 cm) over the 2015 season. In particular, the proportional soil water contribution in the 0-20 cm layer was remarkably higher (13.9%) than that in the 2014 season. Root water uptake patterns with soil moisture distributions were significantly influenced by different irrigation and fertilization treatments, especially in dry seasons. The main water uptake source was the soil water in the top layer (0-20 cm) under the T4 and T5 treatments during the jointing-heading period in 2015, because the root growth in the surface layer was stimulated by sufficient irrigation (80 mm) and abundant fertilization (\geq 210 kg/hm² N) at early growth stages. Nitrogen deficiency with < 105 kg/hm² N (T3) or less irrigation with 20 mm (T1 and T2) during the greening-jointing period promoted root growth in the deep soil layer (70-200 cm) and increased water adsorption by a mean of 29% during the jointing-filling period. Seasonal variations in the quantitative contribution of soil water at different depths were closely related to the soil moisture distributions. The large contribution of soil water in the 0-150 cm layer (86.3%) was consistent with its proportional consumption in soil water storage (92%) throughout the greening to harvest season of winter wheat. This study provides a simple and effective method for identifying crop water sources. The findings are of great significance for future fertilization and irrigation management.

Key Words: dual stable isotopes; root water uptake; MixSIAR model; irrigation and fertilization treatment; winter wheat

灌溉和施肥措施对农田水文循环具有重要影响。根系吸水是联系植物蒸腾和土壤水分运动的关键过程^[1]。定量识别不同灌溉施肥条件下植物根系吸水来源对农田水分高效利用具有重要意义。以往研究根系吸水多采用根系挖掘法,但该方法容易破坏植物生境^[2-3]。稳定同位素(D和¹⁸O)因其本身即为水分子组成部分,且在根系吸水过程中不发生分馏,是识别植物根系吸水来源的理想天然示踪剂^[45]。

利用 D 和¹⁸O 同位素进行植物水分溯源的方法主要包括:直接对比法^[6],两端元和三端元线性混合模型^[7],IsoSource 混合模型^[8],基于贝叶斯理论的 MixSIR、SIAR 和 MixSIAR 混合模型^[9-11]等。直接对比法假设 植物仅利用某一深度的土壤水,而实际上植物水分通常是多个深度土壤水的混合^[2,12-13]。端元混合模型则局 限于计算三种及以下水分来源对植物水的贡献比例^[14-15]。IsoSource 模型可估算多种水分来源对植物水的贡 献比例范围^[1,2,16],但忽略了水源的不确定性且其贡献比例范围不能以单一概率表示。基于贝叶斯统计原理 的混合模型则充分考虑了混合物(植物茎水)和贡献源(土壤水)同位素值的潜在不确定性以及贡献源过参数 化导致的不确定性,其中 MixSIAR 模型最新融合了 MixSIR 和 SIAR 模型的优势,增加了贡献源的多元同位素 原始数据源输入形式、随机效应分类变量和残差+过程误差等模块,显著提升了植物水分来源及其贡献比例 定量计算的准确性^[11]。 伴随同位素测试技术的迅速发展,基于 D 和¹⁸O 同位素的植物水分溯源方法被广泛用于农业系统中^[1-3,17-23]。Zhang 等^[17]利用两端元线性混合模型和 δD—δ¹⁸O 关系图计算了不同生育阶段夏玉米的水分来 源,但该模型需要所有水分来源的 δD 和 δ¹⁸O 之间具有强线性相关关系。其中,应用较为普遍的 IsoSource 混 合模型被用于估算美国 Iowa 中部地区玉米、华北地下水浅埋区夏玉米和棉花和地下水深埋区充分灌溉条件 下冬小麦、西北地区石羊河流域交替隔沟灌溉条件下玉米以及西北内陆干旱区(新疆)棉花的主要根系吸水 深度^[1-3,18-20]。安江龙等^[21]采用底部隔水的塑料管土柱在田间进行了冬小麦种植试验,并应用耦合模型和 IsoSource 模型对比分析了不同生育阶段水源贡献率。相比之下,贝叶斯混合模型利用统计分布方法刻画了作 物水分溯源过程中的不确定性,其计算结果更加准确可靠。Yang 等^[22]采用 MixSIR 模型确定了黑河流域中 游地区玉米的吸水深度,结果表明当地农业灌溉用水效率较低,灌水深度远大于作物根系吸水深度;Ma 和 Song^[23]基于 MixSIAR 模型对比分析了不同施肥条件下夏玉米根系吸水深度的变化规律。但利用 D 和¹⁸O 同 位素和 MixSIAR 模型定量识别灌溉和施肥耦合作用下作物吸水来源季节变化的研究尚未见报道。

为此,本文基于北京市典型农田不同灌溉施肥条件下冬小麦水分运移试验,采用 D 和¹⁸O 双稳定同位素和 MixSIAR 模型量化不同深度土壤水分对作物水的贡献比例,对比不同灌溉施肥条件下冬小麦根系吸水来源的季节分布差异,探讨根系吸水深度与土壤水分变化的关系,该研究可为农田水分高效利用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 田间试验

试验于 2013—2015 年在国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)大兴试验研究基地(39°37′N,116°26′E) 进行。研究区属半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量 540 mm,但 70%—80%的降雨集中在夏季,年平均 气温 12.1℃^[24]。试验基地 0—200 cm 土壤剖面的物理和化学特性参数见表 1。地下水位埋深约 16 m。

冬小麦供试品种为中麦 175,分别于 2013 年和 2014 年 10 月初播种,次年 6 月初收获。试验共设计 5 个 水肥耦合处理,灌溉施肥方案见表 2,其中 T5 处理参考当地常规灌溉施肥水平,总灌溉量和施肥量分别为 300 mm 和 315 kg/hm² N。试验在小区内进行,每个小区面积约 6 m×5 m,每个处理 3 组重复。两季小麦返青后的 第二次灌水时间不同,2014 季在拔节-抽穗期,2015 季在抽穗-灌浆期。灌溉水源为当地地下水,灌溉方式为 地面灌溉。小麦返青后追施尿素,施肥日期分别为 2014 年 3 月 27 日和 2015 年 3 月 29 日。

土壤剖面含水量通过 TRIME-IPH 土壤水分仪(IMKO,德国)测定,测量间距 20 cm,每 5—7 天测量一次, 灌溉和降雨后加测。气象数据由站内的自动气象站(Monitor Sensors, Australia)监测,主要监测指标包括日降 水量、日最高和最低温度、风速、平均温度、平均相对湿度等。2014 季冬小麦生长季内降水量、平均温度和平 均相对湿度分别为 85.9 mm,7.3℃和 53.1%;2015 季则分别为 87.9 mm,7.5℃和 48.7%。2014 和 2015 季参考 作物蒸散发量分别为 435 mm 和 458 mm。

Table 1 Physical and chemical properties of the soil profile											
深度 Depth/cm	土均 Part	襄颗粒约 ticle siz	且成 e/%	土壤质地	干容重 Bulk density/ (g/cm ³)	饱和含水量 $ heta_{ m s}$ Saturated	饱和导水率 <i>K</i> _s Saturated	电导率 EC Electrical conductivity/ (µS/cm)	рН	铵态氮 NH4+N/ (mg/kg)	硝态氮 NO5-N/
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay	Soil texture		water content/ (cm ³ /cm ³)	hydraulic conductivity/ (cm/d)				(mg/kg)
0—20	58.8	33.2	8.0	砂壤土	1.56	0.41	8.41	111.70	8.15	7.0	98.9
20—120	65.3	26.7	8.0	砂壤土	1.48	0.42	10.04	109.12	8.61	5.9	17.9
120—180	68.2	29.2	2.7	砂壤土	1.45	0.45	7.45	87.60	8.66	6.3	20.2
180—200	32.0	51.0	17.0	粉壤土	1.25	0.51	0.66	161.80	8.27	4.4	19.0

表 1 土壤剖面(0-200 cm)物理和化学特性参数

Table 2 Irrigation and fertilization schedule of each treatment for winter wheat													
年份 Year	处理 Treatment	越冬-返青期 Winter dormancy- greening		返青-拔节期 Greening-jointing		拔节-抽穗期 Jointing-heading		抽穗-灌浆期 Heading-filling		灌浆-收获期 Filling-harvest		总量 Total	
		灌溉	施肥	灌溉	施肥	灌溉	施肥	灌溉	施肥	灌溉	施肥	灌溉	施肥
		Irrigation/	Fertilization/	Irrigation/	Fertilization/	Irrigation/	Fertilization/	Irrigation/	Fertilization/	Irrigation/	Fertilization/	Irrigation/	Fertilization/
		mm	(kg/hm^2N)	mm	$(kg/hm^2 N)$	mm	$(kg/hm^2 N)$	mm	$(kg/hm^2 N)$	mm	(kg/hm^2N)	mm	$(kg/hm^2 N)$
2014	T1	60	-	20	105	80	-	-	-	-	-	160	105
	T2	60	-	20	315	80	-	-	-	-	-	160	315
	Т3	60	-	80	105	-	-	-	-	80	-	220	105
	T4	60	-	80	315	-	-	-	-	80	-	220	315
	Т5	60	-	80	210	80	-	-	-	80	-	300	210
2015	T1	60	-	20	105	-	-	80	-	-	-	160	105
	T2	60	-	20	315	-	-	80	-	-	-	160	315
	Т3	60	-	80	105	-	-	-	-	80	-	220	105
	T4	60	-	80	315	-	-	-	-	80	-	220	315
	Т5	60	-	80	210	-	-	80	-	80	-	300	210

表 2 冬小麦灌溉施肥方案

T1:处理1,T2:处理2;T3:处理3;T4:处理4;T5:处理5;T5代表当地常规施肥水平315 kg/hm²N;"-"表示没有灌溉或施肥

1.2 样品采集与同位素分析

本研究于冬小麦返青至收获期间分别采集降水、灌溉水、土壤水和茎秆水并测定不同水体 D 和¹⁸O 同位 素组成。次降水结束后通过由聚乙烯瓶和漏斗组成的收集器采集降水样^[2],并在漏斗口放置乒乓球以防止 水面蒸发,收集的水样迅速转移到 50 mL 聚乙烯塑料瓶中并用封口膜密封。每次灌水时用聚乙烯塑料瓶采集 灌溉水 50mL 并密封保存。土壤水样通过土壤溶液提取器采集,采集深度 10,20,30,50,70,90,110,150 cm 和 200 cm,平均每周采集一次,灌溉和降雨之后加采。当土壤含水量较低无法获取土壤水时,采用土钻钻取土壤 样品并迅速装入样品瓶中密封冷冻保存。

采集土壤水和土壤样的同时,在其采样点周边选取代表性植株3个,每个处理3组重复,每个植株剪取土 壤表面以上和第一个茎节以下的茎秆,迅速去除表皮后放入棕色玻璃样品瓶中,并用封口膜密封。所有的茎 秆样品和土壤样品均在采集后立即置于-15℃到-20℃下冷冻保存。

土壤和茎秆中的水分采用低温真空蒸馏系统(LI-2000,LICA,中国)提取。在中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室采用 LGR 液态水同位素分析仪(Model DLT-100,Los Gatos Research,美国)测量分析不同水体的氘氧稳定同位素比率^[25]:

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

式中, δ 是样品中氘(或氧)的同位素组成, R_{sample} 和 $R_{standard}$ 分别是样品和维也纳国际标准平均海水(VSMOW) 氢(或氧)的重轻同位素丰度之比(²H/¹H 或¹⁸O/¹⁶O),的比值, δ D 和 δ ¹⁸O 的测量精度分别为±1‰和±0.1‰。 1.3 根系水分来源识别

本文首先基于实测土壤水和茎秆水的 δD 和 δ¹⁸O 双稳定同位素信息,采用直接对比法来初步判别冬小麦 不同生育期的根系吸水深度,即通过对比同一时期土壤水 δD 和 δ¹⁸O 同位素剖面及相应的作物茎秆水双稳定 同位素值,当土壤水和茎秆水的 δD 值与两种水体的 δ¹⁸O 值存在共同唯一交点时,该点对应的深度即可判断 为冬小麦的主要根系吸水深度^[2,12];当存在两个或多个共同交点时,根系吸水深度不唯一;若无共同交点,则 难以确定其主要吸水深度^[2,12]。

同时,采用基于贝叶斯理论的 MixSIAR 模型来量化冬小麦水分来源及其贡献比例。由于研究区地下水 位埋深(16 m)远大于华北平原地下水蒸发的极限水位埋深(4—8 m)^[26-27],因此本研究中植物水分来源不考 虑地下水。小麦吸收利用的水分主要来自不同深度的土壤水,是大气降水、灌溉水和早期土壤水的混合体。 根据土壤剖面含水量、土壤水同位素组成和根系分布特征,将2m土体划分为0—20、20—70、70—150 cm和150—200 cm4层进行水源分析。由于土壤水样采集深度为10,20,30,50,70,90,110,150 cm和200 cm,量化水分来源时4个土层对应的土壤水同位素值分别取该层范围内所有采样深度土壤水同位素值的平均值。MixSIAR模型的输入数据包括源(各层土壤水 δD和δ¹⁸O双稳定同位素实测值)数据和混合物(茎秆水)数据,Markov Chain Monte Carlo(MCMC)运行步长为"very long",模型误差选取"process+residual",由此估算得到的每个水源相应的中值(50%分位数)贡献比例即视为该水源对植物水的贡献率。

2 结果

2.1 不同水体同位素分布特征

2014 和 2015 年冬小麦返青至收获试验期间当地大气降水线(LMWL)分别为: δD =7.3 $\delta^{18}O$ +3.6 (R^2 =0. 97, P < 0.01)和 δD =6.7 $\delta^{18}O$ +1.8 (R^2 =0.97, P < 0.01)(图 1)。2015 季降水过程中蒸发速率较快,其 LMWL 斜率明显小于 2014 季 LMWL 的斜率。土壤水蒸发作用强烈,其同位素值基本位于 LMWL 的右下方, δD — $\delta^{18}O$ 拟合线斜率显著低于 LWML。2015 季土壤水 δD — $\delta^{18}O$ 拟合线的斜率(2.8)低于 2014 季(4.0),土 壤水蒸发强度更大。

由图 1 可知,不同深度土壤水同位素值差异显著,表层 0—20 cm 土壤水同位素最为富集,且变化幅度最大,表明 0—20 cm 土壤水发生强蒸发作用,同时受降雨灌溉补给影响。土壤水同位素值变化幅度随土壤深度的增加而逐渐减小。试验期间 150—200 cm 深度土壤水同位素值接近灌溉水的同位素值且无显著变化。作物茎水的同位素基本位于土壤水 δD—δ¹⁸O 同位素拟合线附近,2014 季总体落在 0—150 cm 深度土壤水同位素值范围内,而 2015 季则比较富集且主要落在浅层 0—70 cm 土壤水同位素值区间内,由此可推测 2014 和 2015 季冬小麦分别吸收利用 0—150 cm 和 0—70 cm 深度的土壤水。



图 1 不同水体 δD-δ¹⁸O 关系和当地大气降水线(LMWL)

Fig.1 The relationship between δD and $\delta^{18}O$ in different waters and the local meteorological water line (LMWL) in the (a) 2014 and (b) 2015 growing seasons

2.2 冬小麦不同生育期根系吸水深度

由直接对比法分析可知,2014 季冬小麦返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆和灌浆-收获期根系吸水深度分 别为 0—20、20—70、70—150 cm 和 70—150 cm(图 2), 而 2015 季各生育期的吸水深度则为 0—20、20—70、 0—20 cm 和 20—70 cm(图 3)。不同处理的根系吸水深度季节变化差异显著。2014 季返青-拔节期 T1 和 T5 处理的根系吸水深度为 0—20 cm,T2 为 0—20 cm 和 20—70 cm,T3 和 T4 均为 20—70 cm;拔节-抽穗期 T1 和 T5 处理的根系吸水深度为 20—70 cm, T3 处理为 0—20 cm 和 20—70 cm, 而 T4 处理则深达 70—150 cm; 抽 穗-灌浆期 T2 和 T5 处理的根系吸水深度深达 70—150 cm, T3 和 T4 处理冬小麦则吸收 20—70 cm 土壤水; 灌 浆-收获期除 T1 处理吸水深度回到浅层土壤(0—20 cm 和 20—70 cm)外, 其余处理的吸水深度仍位于 70— 150 cm。2015 季不同处理间冬小麦吸水深度的差异主要体现在拔节-抽穗期, 其中 T1、T2 和 T3 吸水深度位于



图 2 2014 季冬小麦各生育阶段土壤水和茎秆水氘氧同位素分布和根系吸水深度

Fig.2 δD and $\delta^{18}O$ in soil water and stem water and the root water uptake depth at each growth stage of winter wheat in the 2014 season for treatments

T1:处理1;T2:处理2;T3:处理3;T4:处理4;T5:处理5

深层土壤(70—200 cm),而 T4 和 T5 处理则位于浅层(0—70 cm)。2014 季拔节-抽穗期 T2 处理土壤水和茎 秆水 δD 值的交叉点(70—150 cm 和 150—200 cm)与土壤水和茎秆水 δ¹⁸O 值的交叉点(0—20 cm 和 20—70 cm)存在明显差异,T1 处理由 δD 和 δ¹⁸O 同位素推断的抽穗-灌浆期根系吸水深度(分别为 20—70 cm 和 70—



图 3 2015 季冬小麦各生育阶段土壤水和茎秆水氘氧同位素分布和根系吸水深度

Fig.3 δD and $\delta^{18}O$ in soil water and stem water and the root water uptake depth at each growth stage of winter wheat in the 2015 season for treatments

150 cm)亦不同,而灌浆-收获期 T1、T3 和 T4 处理又同时存在两个吸水深度,此时,利用直接对比法难以准确 判定作物的主要吸水深度。

2.3 冬小麦吸水来源及其贡献比例

利用 MixSIAR 贝叶斯同位素混合模型定量计算 2014 和 2015 季冬小麦返青-收获期间不同处理各深度的 土壤水对作物水的贡献比例,并确定各生育阶段冬小麦的主要根系吸水深度。结果表明,0—20、20—70、70— 150 cm 和 150—200 cm 深度的土壤水对作物水平均贡献比例分别为 35.6%、27.6%、23.1%和 13.7%。但两个 生长季冬小麦水分来源差异显著。2014 季冬小麦的主要根系吸水深度随作物的生长发育而逐渐增加,返青-

http://www.ecologica.cn



图 4 2014 和 2015 季冬小麦各生育期土壤水贡献比例(平均值±标准差) Fig.4 Proportions of soil water contributions to winter wheat at each growth stage in 2014 and 2015 seasons (mean ± SD)

2015 季冬小麦主要利用浅层(0—70 cm)土壤水分,各生育期内主要吸水深度及其土壤水贡献比例分别为0—20 cm(70.4%)、70—150 cm(32.2%)、0—20 cm(63.4%)和20—70 cm(54.9%)(图4)。其中,2015 季0—20 cm 深度土壤水的贡献比例明显高于2014 季(13.9%),但拔节-抽穗期受干旱气候(降水比2014 年减少了26.9 mm)影响,70—150 cm 和150—200 cm 深层土壤水的贡献比例(32.2%和23.5%)显著提升。

不同灌溉施肥条件下冬小麦拔节-抽穗期根系吸水来源年季变化差异显著。受气候干旱影响,低施肥 (150 kg/hm² N)处理 T3 2015 季主要根系吸水深度大于 2014 季,150—200 cm 土壤水的贡献比例增至 38.9%。 T1 和 T2 处理 2015 季比 2014 季减少灌水(80 mm)一次,导致水分亏缺加剧,且作物迅速生长、耗水速率增大, 促使 T1 处理 150—200 cm(47.3%)和 T2 处理 70—150 cm(66.6%)的土壤水贡献比例最大。当返青-拔节期 灌水充足(80 mm)且施肥量≥ 当地施肥量 210 kg/hm² N 时,2015 季拔节-抽穗期气候干旱反而促使 T4 和 T5 处理表层 0—20 cm 根系吸水比例分别增加 51.8%和 63.6%。2015 季抽穗-灌浆期复水后,T1、T2 和 T5 处理灌 浆-收获期主要根系吸水深度(20—70 cm)明显小于 2014 季(70—150 cm)。

3 讨论

8

3.1 直接对比法和 MixSIAR 模型比较

采用直接对比法和 MixSIAR 模型识别的不同生育阶段冬小麦根系吸水深度结果基本一致。但直接对比

9

法仅限于推测单一吸水深度,忽略了多种水源组合对冬小麦水分利用的影响,其判别结果具有不确定性;且当 茎秆水与土壤水的 δD 和 δ¹⁸O 同位素剖面无共同交点或者存在多个交点时,无法准确判定其主要吸水深度。

MixSIAR 模型则基于贝叶斯统计理论,结合双稳定同位素剖面分布特征,考虑多水源混合作用,提高了不同深度土壤水对作物水贡献比例计算的准确性。例如,本文采用 MixSIAR 模型确定的冬小麦返青-拔节和拔节-抽穗期主要吸水深度 0—20 cm 和 20—70 cm,与前人研究中王鹏^[2](分别为 0—20 cm 和 40—70 cm)和安 江龙等^[21](分别为 0—20 cm 和 0—40 cm)的结果基本吻合。但后期由于受降雨、灌溉和施肥等因素影响,研究结果存在一定差异。苑晶晶等^[15]研究表明冬小麦返青期内作物根系主要分布在表层,表层土壤水的贡献比例最高,此后受降雨和灌溉分布影响,不同处理间根系吸水深度差异明显,与本文不同灌溉施肥处理根系吸水深度年季变化差异相一致,从而进一步验证了 MixSIAR 模型计算结果的可靠性。

3.2 根系吸水与土壤水分变化关系

冬小麦返青至收获期间 0—200 cm 剖面土壤储水量平均减少了 127.9 mm,其中,0—150 cm 深度的土壤 水消耗量约占 92%。由图 5 可知,150—200 cm 深度土壤含水量变化不大,与主要根系吸水深度在 150 cm 以 内(贡献比例 86.3%)一致。2015 季冬小麦根系吸水深度为 0—70 cm,其 0—70 cm 土壤水消耗量显著高于 2014 季(平均多 39 mm)(图 5)。2015 季拔节-抽穗期气候干旱加之未补充灌溉,导致该时期土壤储水减少量 最大(98.1 mm),约占全生育期土壤储水总消耗量的 67.4%。不同处理间土壤水变化差异显著,T4 处理土壤 储水消耗量最多,2014 和 2015 季分别达 151.8 mm 和 174.5 mm。常规灌溉施肥处理 T5 在 2014 生长季内土 壤水消耗量最少(80.3 mm),但 2015 季土壤水消耗量显著增加,总耗水量达 143.4 mm。

冬小麦试验期间土壤水的主要补充水源为降水和灌溉水,降水分布和不同处理间灌溉制度的差异直接影响了土壤水分分布的季节变化。此外,不同施肥量导致作物养分吸收和生长动态不同,对作物水分利用过程产生了重要影响。在华北平原,冬小麦最大根深可达2m,根系主要分布在80 cm 以内,其中0—40 cm 土层根量和根长密度最大^[28]。灌水次数越多表层根量越大^[28],干旱环境下增施氮肥会刺激表层根系生长^[29],且土壤水贡献比例与根长密度占比显著线性相关^[23],因此,2015季T4和T5处理拔节-抽穗期冬小麦主要利用表层(0—20 cm)土壤水分。低氮处理则促进深层根系发育,T1和T3处理深层土壤(150—200 cm)贡水比例显著增加43.1%。而干旱环境下表层土壤水分严重亏缺时作物深层根系较发达且侧生根增多^[30],80 cm 以下深层土壤水分消耗比例较大^[28],从而证明了2015季灌水量较少的T1和T2处理平均约85%的作物水来源于深层土壤(70—200 cm)水。干旱后复水灌溉使得冬小麦对表层土壤水分利用非常明显^[15],2015季抽穗-灌浆期根系吸水深度回到表层0—20 cm。在今后的研究中,将补充测定不同时期作物根系分布和根系水的同位素组成,从而进一步验证本文的研究结果。

4 结论

基于冬小麦农田灌溉施肥控制试验,运用 δD 和 δ¹⁸O 双稳定同位素和 MixSIAR 贝叶斯混合模型,定量研 究了不同生育阶段冬小麦主要吸水来源及其贡献比例,并讨论了根系吸水与土壤水分分布变化的相互关系。 主要结论包括:

1)冬小麦返青后,0—20、20—70、70—150 cm 和 150—200 cm 深度的土壤水对作物水平均贡献比例分别为 35.6%、27.6%、23.1%和 13.7%。返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆和灌浆-收获期的主要根系吸水深度分别为 0—20、20—70、0—20 cm 和 20—70 cm。

2)受降水灌溉分布影响,2014 和 2015 年季间冬小麦主要根系吸水深度差异显著。2014 季主要吸水深度 从返青-拔节期的 0—20 cm(63.6%)逐渐增加至抽穗-灌浆的 70—150 cm(67.9%),灌浆-收获期保持在 70— 150 cm(54.4%);而 2015 季冬小麦则主要利用浅层(0—70 cm)土壤水分,其中 0—20 cm 深度土壤水的贡献 比例明显高于 2014 季(13.9%)。

3)不同处理间根系吸水来源的差异主要发生在作物生长中期,尤其在气候干旱和无补充灌溉条件下的



图 5 2014 和 2015 年冬小麦返青后降水、灌溉和土壤含水量分布

Fig.5 Precipitation, irrigation, and soil water content distribution of winter wheat after greening in the 2014 and 2015 growing seasons for treatments

2015 季拔节-抽穗期,返青-抽穗期仅灌水 20 mm(T1 和 T2 处理)或施肥 105 kg/hm² N(T3 处理)条件下拔节-抽穗期深层(70—200 cm)土壤水分利用率平均增加 29%,但当前期充分灌水且大量施肥(≥ 当地施肥量 210 kg/hm² N)时根系吸水深度则位于土壤表层 0—20 cm(T4 和 T5 处理)。

4)试验年份冬小麦生长期为枯水季(平均降水量 86.9 mm),作物水分来源与土壤水分分布密切相关,0— 150 cm 深度内土壤水对作物水的贡献比例(86.3%)与该深度内土壤储水减少量占比(92%)基本一致。该研 究表明,MixSIAR 模型可简单有效的定量计算农田根系吸水来源,为合理制定灌水深度和施肥量提供了新的 方法。

参考文献(References):

- [1] Asbjornsen H, Mora G, Helmers M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U.S. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 121(4): 343-356.
- [2] 王鹏. 基于氢氧稳定同位素的农田 SPAC 系统水分运移规律研究:以山西省运城市董村农场为例[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2010.
- [3] Zhang Y C, Shen Y J, Sun H Y, Gates J B. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: a combined isotopic and micrometeorologic approach. Journal of Hydrology, 2011, 408(3/4): 203-211.
- [4] Zimmermann U, Ehhalt D, Munnich K O. Soil water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water// Proceedings of IAEA Symposium on Isotopes in Hydrology. Vienna: IAEA, 1967: 567-584.
- [5] Sprenger M, Leistert H, Gimbel K, Weiler M. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes. Reviews of Geophysics, 2016, 54(3): 674-704.
- [6] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment. Journal of Hydrology, 1995, 167(1/4): 351-368.
- [7] Snyder K A, Williams D G. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/3): 227-240.
- [8] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [9] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. Ecology Letters, 2008, 11(5): 470-480.
- [10] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, Jackson A L. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. PLoS One, 2010, 5(3): e9672.
- [11] Stock B C, Semmens B X. MixSIAR GUI User Manual, version 1.0. http://conserver.iugo-cafe.org/user/brice.semmens/MixSIAR.
- [12] Yang B, Wen X F, Sun X M. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 218-228.
- [13] 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 邓海军, 方功焕. 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究. 生态学报, 2016, 36(3): 729-739.
- [14] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of Juniperus ashei on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. Journal of Hydrology, 2007, 342(3/4): 238-248.
- [15] 苑晶晶,袁国富,罗毅,孙晓敏,张娜. 利用δ¹⁸0 信息分析冬小麦对浅埋深地下水的利用. 自然资源学报, 2009, 24(2): 360-368.
- [16] 刘自强, 余新晓, 娄源海, 李瀚之, 贾国栋, 路伟伟. 北京山区侧柏水分利用策略. 生态学报, 2017, 37(11): 3697-3705.
- [17] Zhang C Z, Zhang J B, Zhao B Z, Zhu A N, Zhang H, Huang P, Li X P. Coupling a two-tip linear mixing model with a δD-δ¹⁸O plot to determine water sources consumed by maize during different growth stages. Field Crops Research, 2011, 123(3): 196-205.
- [18] Wu Y J, Du T S, Li F S, Li S E, Ding R S, Tong L. Quantification of maize water uptake from different layers and root zones under alternate furrow irrigation using stable oxygen isotope. Agricultural Water Management, 2016, 168: 35-44.
- [19] 张景文,陈报章.基于同位素分析研究山东禹城夏玉米水分来源.水土保持学报, 2017, 31(4): 99-104.
- [20] 李惠,梁杏,刘延锋,刘亚磊,鲜阳.基于氢氧稳定同位素识别干旱区棉花水分利用来源.地球科学,2017,42(5):843-852.
- [21] 安江龙,马娟娟,张亚雄,李蕊,孙西欢,郭向红.两种模型分析方法下冬小麦根系吸水深度的对比研究. 灌溉排水学报,2017,36 (11):25-28.
- [22] Yang B, Wen X F, Sun X M. Irrigation depth far exceeds water uptake depth in an oasis cropland in the middle reaches of Heihe River Basin. Scientific Reports, 2015, 5: 15206.

- [23] Ma Y, Song X F. Using stable isotopes to determine seasonal variations in water uptake of summer maize under different fertilization treatments. Science of the Total Environment, 2016, 550: 471-483.
- [24] Cai J B, Liu Y, Xu D, Paredes P, Pereira L S. Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(7): 1045-1059.
- [25] West A G, Patrickson S J, Ehleringer J R. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2006, 20(8); 1317-1321.
- [26] 雷志栋,杨诗秀,倪广恒,薛迎洲.地下水位埋深类型与土壤水分动态特征.水利学报,1992,(2):1-6.
- [27] Luo Y, Sophocleous M. Seasonal groundwater contribution to crop-water use assessed with lysimeter observations and model simulations. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 325-335.
- [28] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. Hydrological Processes, 2004, 18 (12): 2275-2287.
- [29] Carvalho P, Foulkes M J. Roots and uptake of water and nutrients//Christou P, Savin R, Costa-Pierce B A, Misztal I, Whitelaw C B A, eds. Sustainable Food Production. New York: Springer, 2013: 1390-1404.
- [30] Jha S K, Gao Y, Liu H, Huang Z D, Wang G S, Liang Y P, Duan A W. Root development and water uptake in winter wheat under different irrigation methods and scheduling for North China. Agricultural Water Management, 2017, 182: 139-150.