

基于同位素示踪的不同生境果草复合系统水分利用策略

赵 玲^{1,2}, 张 露¹, 赵 妮³, 戈建珍¹, 金晶炜^{1,4,5}

(1.西北农林科技大学草业与草原学院,陕西 杨凌 712100;
2.西藏自治区墨竹工卡县农业农村局,拉萨 850000;3.北京理加联合科技有限公司,北京 100085;
4.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;5.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为明确不同生境果草复合系统的水分利用策略。利用稳定同位素示踪方法,研究不同生境(陕西关中杨凌和陕北洛川)单作苹果(SA)和果草复合系统(苹果+白三叶(AW)、苹果+黑麦草(AR))土壤水、木质部和茎部水的氢、氧同位素值,利用直接对比法和 IsoSource 模型分析不同生境下果草复合系统在不同季节的水分利用策略。结果表明:不同生境下,陕西关中杨凌土壤含水量在垂直方向上的波动较陕北洛川大,杨凌地区 40—80 cm 土层土壤水分的消耗大于洛川地区,杨凌果园旱季种植白三叶会加大深层土壤水分的消耗。旱季时,洛川地区果树主要利用土壤水深度为 40—100 cm(63.0%),牧草为 0—20 cm(65.0%);杨凌地区果树水分利用层位较洛川低,SA 和 AW 的果树为 20—40 cm(54.3%),AR 为 40—100 cm(65.0%),白三叶和黑麦草分别为 0—20 cm(59.3%)和 20—40 cm(62.2%)。雨季时,两地果树水分来源层位相同,SA 主要利用 20—40 cm,AW 和 AR 主要利用 40—100 cm,牧草介入使果树吸水层位下移。结果说明,不同生境下,果草复合系统会随季节变化调整水分利用策略,洛川地区果草复合系统对水分变化的响应更快,在水分不足时加大对深层土壤水的利用,避免水分竞争,对生境异质的适应机制较杨凌地区好。杨凌地区果草复合系统对土壤起到蓄水作用,但旱季会加大深层土壤水分消耗,应适时补充灌溉。

关键词: 生境; 同位素; 果草复合系统; 水分来源

中图分类号: S812.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0086-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.013

Water Use Strategy of Fruit-Grass Complex Systems in
Different Habitats Based on Isotope Tracer

ZHAO Ling^{1,2}, ZHANG Lu¹, ZHAO Ni³, GE Jianzhen¹, JIN Jingwei^{1,4,5}

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;
2.Mozhugongka County Bureau of Agriculture and Rural Areas, Lhasa 850000; 3.LICA United Technology Co., Ltd., Beijing 100085; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 5.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to determine the water use strategy of fruit-grass complex system in different habitats, we studied the hydrogen and oxygen isotopic values of soil water, xylem and stem water of single cropping apple (SA) treatment and fruit grass composite systems (apple+white clover (AW), apple+ryegrass (AR)) in Yangling of Guanzhong and Luochuan of Northern Shaanxi. Direct comparison method and IsoSource model were used to analyze the water use strategy of fruit-grass complex systems in different seasons under different habitats. The results showed that under different habitats, the vertical fluctuation of soil water content of orchard in Yangling area was larger than that in Luochuan area. The consumption of soil water in 40—80 cm layer in Yangling was greater than that in Luochuan. The planting of white clover in Yangling orchard in dry season would increase the consumption of deep soil water. In the dry season, the depth of soil water mainly used by apple trees was 40—100 cm (63.0%), and that of the forage was 0—20 cm (65.0%). The water use level of apple trees in Yangling was lower than that in Luochuan. The depth of soil water used by apple trees in SA and AW was 20—40 cm (54.3%), that in AR was 40—100 cm (65.0%). The depth of soil water used

收稿日期:2021-07-30
资助项目:陕西省重点研发计划项目(2021NY-006);国家自然科学基金项目(31601987);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)
第一作者:赵玲(1986—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤—植物系统水分循环研究。E-mail:554914221@qq.com
通信作者:金晶炜(1980—),女,博士,副研究员,主要从事土壤—植物系统水分循环研究。E-mail:jinjingweisoi12008@163.com

by white clover and ryegrass was 0—20 cm (59.3%) and 20—40 cm (62.2%), respectively. In the rainy season, the water source layer of apple trees in both places were the same, the depth of soil water used by apple tree in SA was 20—40 cm, that in AW and AR was 40—100 cm. And the forage intervention moved down the water absorption layer of apple trees. The results indicated that the fruit-grass complex system could adjust its water use strategy with the seasonal changes in different habitats. The fruit-grass complex system in Luochuan area responded more quickly to the water change, and increased the use of deep soil water when water was insufficient to avoid water competition. And it had a better adaptation mechanism to habitat heterogeneity than that in Yangling. In Yangling area, the fruit-grass complex system could store soil water, but would increase the consumption of deep soil water in the dry season, so it should be supplemented with irrigation timely.

Keywords: different habitats; isotope; fruit-grass complex system; water source

陕西省是我国苹果种植的第一大省,种植区主要分布于陕西北部、渭北和关中地区,该地区由于水资源短缺、水分利用效率低以及高密度的粗放种植模式制约了果业可持续发展。果草复合系统作为优良的果园管理模式,已被世界上许多国家和地区广泛采用^[1],它是一种具有多种功能的复合生态系统,系统组分之间通过相互作用,以一种较为和谐的方式衔接起来,可有效提高水土保持能力和改善生态环境^[2],进而提高系统的生态效益和经济效益^[3]。随着果业的发展,白三叶(*Trifolium repens*)、黑麦草(*Lolium perenne*)在果草复合系统成为主要牧草品种,对提高黄土高原生态工程建设、改善果园的生态环境、提高果园产量和苹果品质发挥了重要作用^[3-4]。

根系是植物获取水、肥的主要器官,但植物种类差异和生境条件致使根系分布格局不同,导致植物的水分来源存在差异,成为植物对环境变化的适应机制^[5]。稳定同位素示踪技术具有精确度高、破坏性小的特点,被广泛应用于不同生态系统的植物水分来源研究^[6-8],为生态系统的水分交换和水循环提供清晰的示踪信息,是研究植物生态学的重要工具。近年来,国内外学者^[3-4,9-10]对果草复合系统的研究主要集中于生草对土壤理化性质和果实品质方面,生草可以改善土壤结构,提高肥力,增加土壤微生物,提高水果产量。果草复合系统对土壤水分影响的研究集中于同一生境条件下多个牧草品种的比较分析^[2,4],对揭示生草在不同生境条件下对果园土壤水分的影响,以及果园植物水分利用策略存在局限性。因此,研究不同生境果草复合系统水分利用状况对生境异质性的响应和适应机制,以及维持果园生态系统结构和果园水分优化管理具有重要意义。

本研究采用稳定同位素示踪技术,通过比较不同生境条件下果树木质部水、牧草茎部水和土壤水的同位素值,定量研究不同复合系统中果树和牧草水分来源的变化,揭示不同生境下果草复合系统的水分适应

机制,为果草复合系统模式的推广和应用提供科学依据,对全球气候变化影响下果园生态系统水分变化规律提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择陕北洛川和陕西关中杨凌作为研究区域,样地分别选取于西北农林科技大学延安市洛川苹果试验站和陕西杨凌国际合作科技园—现代农业创新园的苹果试验基地。

西北农林科技大学延安市洛川苹果试验站位于陕西省延安市洛川县(109°36'E,35°48'N),属于温带半湿润大陆性季风气候,海拔 1 072 m,年降水量 622 mm,雨季主要集中在 5—9 月,年平均气温 9.2℃,年均日照时间 2 524 h,土壤以黄绵土和黑垆土为主,地下水位埋深 40~50 m。

陕西杨凌国际合作科技园—现代农业创新园的苹果试验基地位于秦岭北麓,渭河平原西部塬上(108°02'E,34°18'N),属于温带湿润大陆性季风气候,海拔 525 m,年降水量 621.6 mm,雨季主要集中在 7—9 月,年平均气温 14.1℃,年均日照时间 2 150 h,土壤为黑垆土,地下水位埋深 40~70 m。

关中盆地和洛川旱塬特殊的地形地势,以及海拔、温度和降水不同,存在环境异质性。2018 年 1—10 月杨凌地区降水量为 861 mm,高于多年平均降水量,较洛川地区(523 mm)高 64.7%,属于关中地区典型的丰水年。杨凌地区 5,7 月降雨量分别为 41,207 mm,洛川分别是 58,139 mm,降雨量最高月份均为 7 月。2018 年,杨凌地区气温整体高于洛川,1—10 月 2 个地区平均气温相差 4.7℃,杨凌和洛川最高气温分别为 29.3,23.1℃,且 8 月最高(图 1)。

1.2 样地选择及样品采集

在研究区内分别选取单作苹果系统(single apple, SA)、苹果+白三叶复合系统(apple+white clover, AW)和苹果+黑麦草复合系统(apple+ryegrass,

AR)作为样地。洛川样地苹果树、白三叶和黑麦草均为 2012 年建植,苹果品种为“红富士”。果树林带行向为东西向,果树株行距为 4 m×3 m,果树行间种植牧草,宽度为 2 m,间作牧草距离树行 60 cm。杨凌样地苹果树、白三叶和黑麦草均为 2009 年建植,苹果品种为“长富 2 号”。果树株行距为 4 m×2 m,行间种植牧草宽度为 2 m,果树林带行向为南北向,牧草行向与苹果树行向一致。2 个样地的果园管理措施一致。

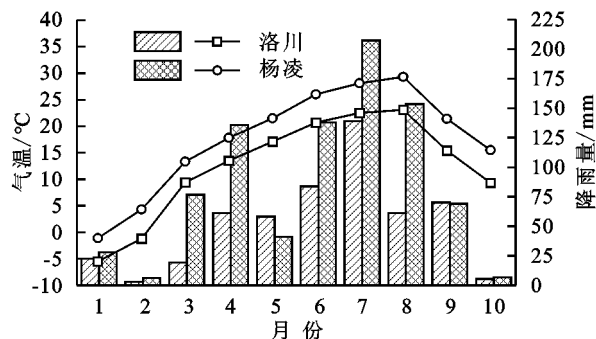


图 1 杨凌地区和洛川地区降雨量与温度变化

试验于 2018 年 5、7 月开展,分别于旱季和雨季在洛川(旱季 5 月 30 日、雨季 7 月 20 日)和杨凌(旱季 5 月 29 日、雨季 7 月 22 日)进行植物和土壤样品采集,每个处理重复 3 次。为了尽量减少光照强度、气温升高等外界条件对同位素分析结果的影响,在上午 09:00—11:00 完成土壤、苹果木质部和牧草茎的采集。

土壤样品采集:在距离树干靠近牧草两侧 50, 100, 150, 200 cm 处钻取土壤样品,因果草复合系统中牧草和苹果根系集中分布在 0—30, 20—80 cm,故采样深度为 100 cm(每 10 cm 为 1 层),将各点土壤充分混合,迅速装入塑料瓶中,用 Parafilm 封口膜双层密封,存放于便携式冰箱中,带回实验室低温保存。所采样品分成 2 份,一份用于测定土壤含水量,另一份用于测定土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值。

木质部采集:在苹果树树冠中部 1 年生枝条采集非绿色枝条 4.0~5.0 cm,快速去除韧皮部,保留木质部,装入 EPA 标准样品瓶,Parafilm 封口膜双层密封后 -20 °C 保存。

茎部采集:在草本植物气孔开放时,取直径 0.5~1.0 cm、长 10.0~15.0 cm 完全硬化的草本植物茎部,迅速将样品装入 EPA 标准样品瓶,Parafilm 封口膜双层密封后低温保存。

1.3 测定项目及方法

利用自动气象站连续观测降雨量和温度,采用烘干法测定土壤含水量。利用低温真空蒸馏法(Li-2000 植物水和土壤水真空抽取系统,北京理加联合科技有限公司)对土壤、苹果木质部和牧草茎部水样进行抽提。植物水和土壤水同位素分别在北京理加联合有限公司

(LGR 912-0008)和西安理工大学同位素实验室(LGR DLT-100)进行测定。 δD 和 $\delta^{18}O$ 采用 V-SMOW 标准来表示,精度 δD 为 $\pm 0.5\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

1.4 植物水源判断方法

利用直接对比法和多元混合模型(IsoSource)分析植物水分来源及植物对土壤水的利用比例。首先,根据木质部水和茎部水同位素值与各层土壤水同位素值的交点,初步判断植物吸水的可能层位;然后,利用多元混合模型(IsoSource)来定量地分析各水源的相对贡献率。该模型基于同位素质量平衡原理,模型总共可设定 10 种不同的水源。

$$\delta X_P = \sum_{i=1}^n f_i \delta X_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (2)$$

式中: δX_P 为植物木质部水分稳定氢氧同位素值; δX_i 为潜在水源 i 的稳定氢氧同位素值; f_i 为潜在水源 i 在植物所利用水分总量中的贡献率。

在运用 IsoSource 模型时,将土壤剖面细分为 3 个潜在水源,源增量设为 1%,质量平衡容忍度设为 0.01,因为不同土层间土壤水同位素组成的相似性,潜在水源过多,增加了识别独特水源的复杂性。用于计算贡献率的水分源 0—10, 10—20, 20—30, ..., 90—100 cm 土层深度 δD 值,根据植物的生活性、根系分布、土壤含水量和同位素组成变化,将土壤层合并成浅层土壤(0—20 cm)、中层土壤(20—40 cm)和深层土壤(40—100 cm)3 种潜在水源,便于清楚的区分植物水源变化。

1.5 数据处理与分析

利用 SPSS 22.0 软件分析不同系统间土壤含水量以及土壤水同位素值的差异性(One-way Anova 法);采用 Independent-samples T Test 检验不同生境样地显著性差异;利用 Origin 2018 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同生境下果草复合系统土壤含水量季节变化特征

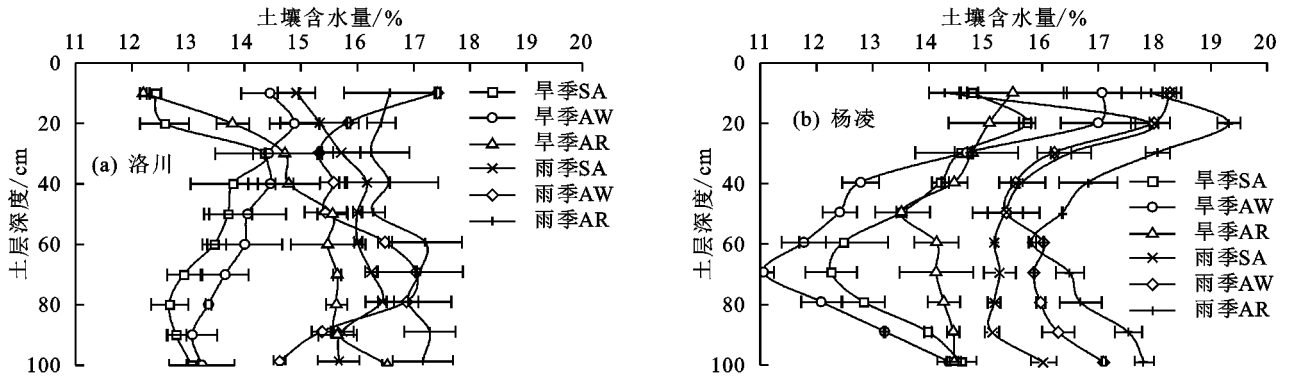
不同生境下各系统土壤含水量在旱季和雨季表现不同(图 2),洛川样地土壤含水量在整个土壤剖面上较稳定,而杨凌样地波动更明显。洛川样地 SA、AW 和 AR 的土壤含水量范围分别为 12.4%~16.4%, 13.1%~17.4%, 12.3%~17.3%, 杨凌样地分别为 12.3%~17.9%, 11.1%~18.3%, 13.5%~19.3%。旱季时,洛川样地 SA 和 AW 土壤含水量随土壤深度增加呈先增加再减少的变化趋势,而 AR 呈逐渐递增的趋势。0—30 cm 含水量波动稍大,30 cm 以下趋于稳定,各土层间差异不显著($P > 0.05$),AR 在 40 cm 以下显著高于 AW 和 SA($P < 0.05$)。雨季时,3

个系统各土层土壤含水量整体提高,SA 同旱季趋势相似,AW 土壤含水量呈波动式变化,而 AR 在垂直水平上变化不大,呈递增趋势。

杨凌样地各系统(除旱季 AR 外)土壤含水量随土壤深度的增加呈倒“S”形趋势变化。旱季时,各系统表层土壤含水量(0—20 cm)大于深层土壤(40—100 cm),尤其是 SA 和 AW 垂直方向上波动明显,70 cm 层土壤含水量最低,AW 水分损耗高于 SA,AR 在整个剖面趋于稳定,表现出良好的持水力。经过降水,各土层水分均得到补充,尤其是在旱季出现深层

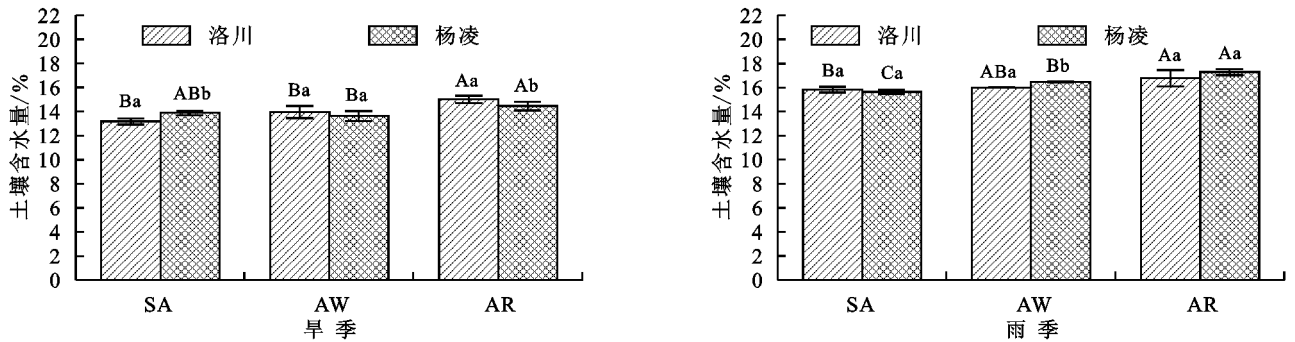
土壤水分亏损的 AW 在雨季得到恢复。

2 个样地雨季土壤平均含水量高于旱季(图 3),复合系统(除杨凌旱季 AW 外)土壤平均含水量高于单作系统,3 个系统中 AR 平均含水量最高。在不同生境下,旱季杨凌样地 SA 土壤平均含水量显著高于洛川样地($P<0.05$),复合系统较洛川样地低;雨季则相反,且杨凌 AW 显著高于洛川($P<0.05$)。不同深度的土壤含水量受降雨和蒸发的影响不同,杨凌样地 0—20 cm(除雨季 SA 外)显著高于洛川样地($P<0.05$),但 40—80 cm 则低于洛川样地。



注:SA、AW、AR 分别为单作系统、苹果+白三叶复合系统、苹果+黑麦草复合系统。下同。

图 2 不同生境下各系统含水量随土层深度变化



注:柱柱上方不同大写字母表示同一生境下不同系统土壤平均含水量的差异性;不同小写字母 a、b 表示不同生境下相同系统土壤平均含水量的差异性;显著性水平 $P<0.05$ 。下同。

图 3 不同生境下各系统平均含水量随季节变化

2.2 不同生境果草复合系统土壤水和木质部水的同位素变化特征

不同生境下,2 个样地土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在垂直方向变化趋势相似,并随气候变化发生改变(图 4)。在旱季,0—10 cm 层土壤水氢、氧同位素分馏明显,重同位素富集, δD 和 $\delta^{18}O$ 值最大。所有系统均表现出同位素表层富集,随着土层增加同位素值降低开始贫化。0—30 cm 各土层间的 δD 和 $\delta^{18}O$ 差异显著($P<0.05$),40—100 cm 同位素值呈增加的趋势,且波动较小。雨季变化趋势与旱季截然相反,受降雨影响,表层土壤同位素贫化,随着土层深度增加, δD 和 $\delta^{18}O$ 呈先增加再减小的趋势。旱季,洛川样地 SA 的 δD 范围为 $-68.8\text{‰} \sim -16.3\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-9.1\text{‰} \sim -1.8\text{‰}$;AW 的 δD 值为 $-65.9\text{‰} \sim -10.6\text{‰}$, $\delta^{18}O$

为 $-7.7\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$;AR 的 δD 为 $-67.8\text{‰} \sim -18.1\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-7.9\text{‰} \sim -1.1\text{‰}$ 。杨凌样地 SA 的 δD 为 $-78.3\text{‰} \sim -8.8\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-10.7\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$;AW 的 δD 为 $-75.3\text{‰} \sim -6.0\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-10.2\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$;AR 的 δD 为 $-76.6\text{‰} \sim -5.9\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-10.5\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$ 。杨凌样地各系统土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化幅度大于洛川样地。洛川样地各个系统表层富集,随着土层深度的增加 δD 和 $\delta^{18}O$ 开始贫化,SA 和 AR 在 60 cm 处达到波谷,AW 在 50 cm 处达到波谷,到深层土壤后 δD 开始富集,且波动较小,3 个系统变化趋势一致,各系统间 50 cm 以上土层 δD 值无显著差异($P>0.05$), δD 与 $\delta^{18}O$ 值变化趋势基本一致。杨凌样地各系统的 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化趋势和洛川样地相似,表层重同位素富集随土层深度增加迅速贫化,到 40 cm 处达到波谷,

到 80 cm 处 AW 明显大于其他系统。

雨季,洛川样地 SA 的 δD 范围为 $-76.1\text{‰} \sim -53.5\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-9.2\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$; AW 的 δD 为 $-77.0\text{‰} \sim -57.8\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-10.3\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$; AR 的 δD 为 $-77.6\text{‰} \sim -65.1\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-9.8\text{‰} \sim -8.1\text{‰}$ 。杨凌样地 SA 的 δD 为 $-76.4\text{‰} \sim -61.9\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-10.1\text{‰} \sim -8.2\text{‰}$; AW 的 δD 为 $-69.2\text{‰} \sim -51.9\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-9.1\text{‰} \sim -7.2\text{‰}$; AR 的 δD 为 $-75.8\text{‰} \sim -54.8\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-10.0\text{‰} \sim -7.7\text{‰}$ 。洛川样地各系统土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化幅度大于杨凌样地,与旱季相比变化幅度明显变小。由于临近降雨事件,土壤表层同位素贫化严重,其中,洛川样地的 SA 和 AR 在 0—10 cm 处 δD 值最低,随土层深度增加同位素开始富集,SA 和 AW 在 50 cm 处达到峰值,而 AR 在更深土层达到峰值,到 80 cm 以下趋于稳定。杨凌样地 3 个系统 δD 与 $\delta^{18}O$ 变化趋势与洛川样地一致,SA 在 40 cm 处达到峰值,复合系统则是在 60 cm 处达到峰值,同位素在垂直方向波动比旱季小。旱季时,杨凌样地 δD 值比洛川样地略显

低,在 30—50 cm 土层差异显著,SA 和 AR 在 0—10 cm 土层差异显著 ($P < 0.05$);雨季时,洛川样地 AW 和 AR 的 δD 值比杨凌样地低,SA 在 40 cm 以上 δD 值低于杨凌样地,40 cm 以下却高于杨凌样地。

与土壤水相比,木质部和牧草茎部水的同位素变化幅度偏小。洛川样地苹果木质部 δD 的范围为 $-69.5\text{‰} \sim -60.9\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-9.7\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$,牧草茎为 $-70.8\text{‰} \sim -14.9\text{‰}$, $-9.1\text{‰} \sim -0.8\text{‰}$;杨凌样地木质部 δD 的范围为 $-65.3\text{‰} \sim -60.7\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-8.9\text{‰} \sim -6.1\text{‰}$,牧草茎为 $-67.1\text{‰} \sim -24.8\text{‰}$, $-8.9\text{‰} \sim -2.9\text{‰}$ 。旱季木质部和牧草茎部水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 高于雨季,且差异显著 ($P < 0.05$),2 个样地的各系统间木质部同位素差异不明显,而白三叶茎部同位素显著高于黑麦草 ($P < 0.05$)。旱季到雨季土壤同位素值变小,植物水同位素也相应的变小,牧草茎同位素变化幅度最大,说明牧草对降水能够做出更快的响应,而洛川样地木质部和茎部同位素变化幅度大于杨凌样地,说明洛川样地植物对降水响应比杨凌样地更明显。

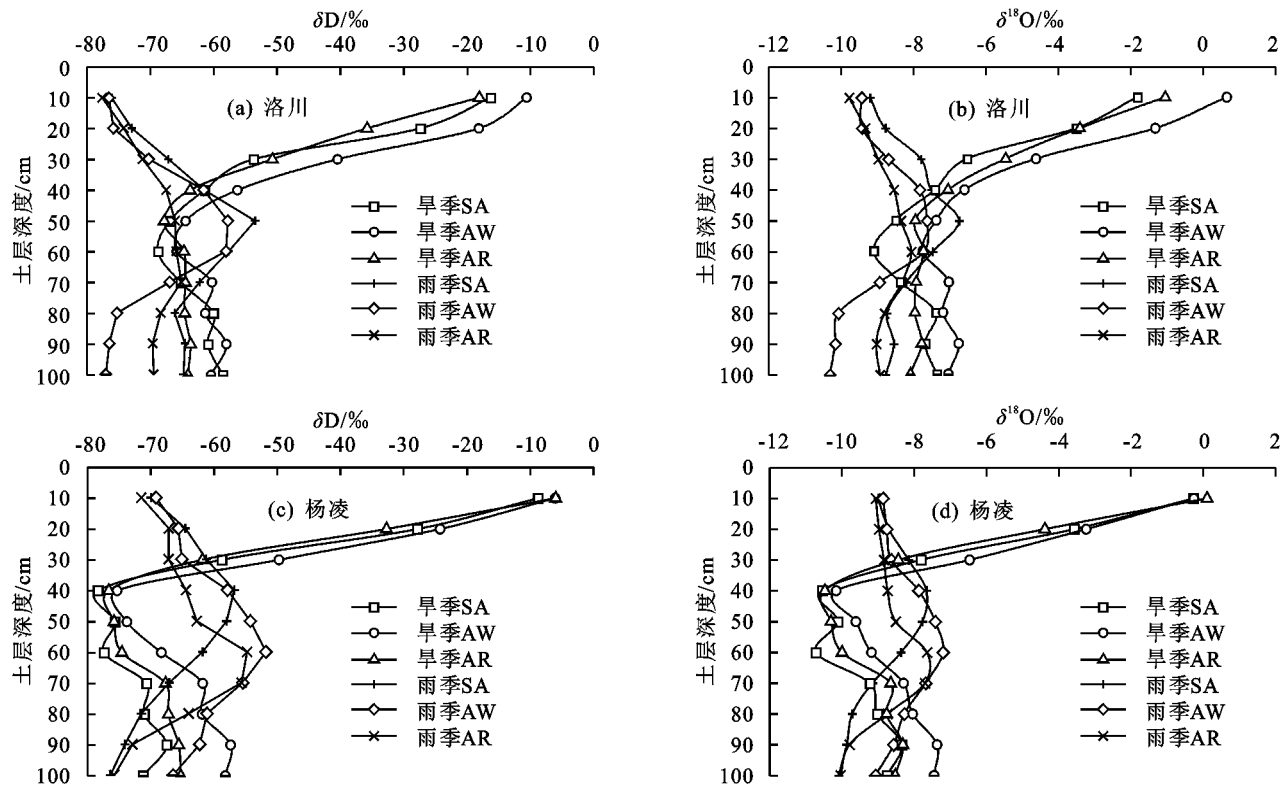


图 4 不同生境下各系统土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化特征

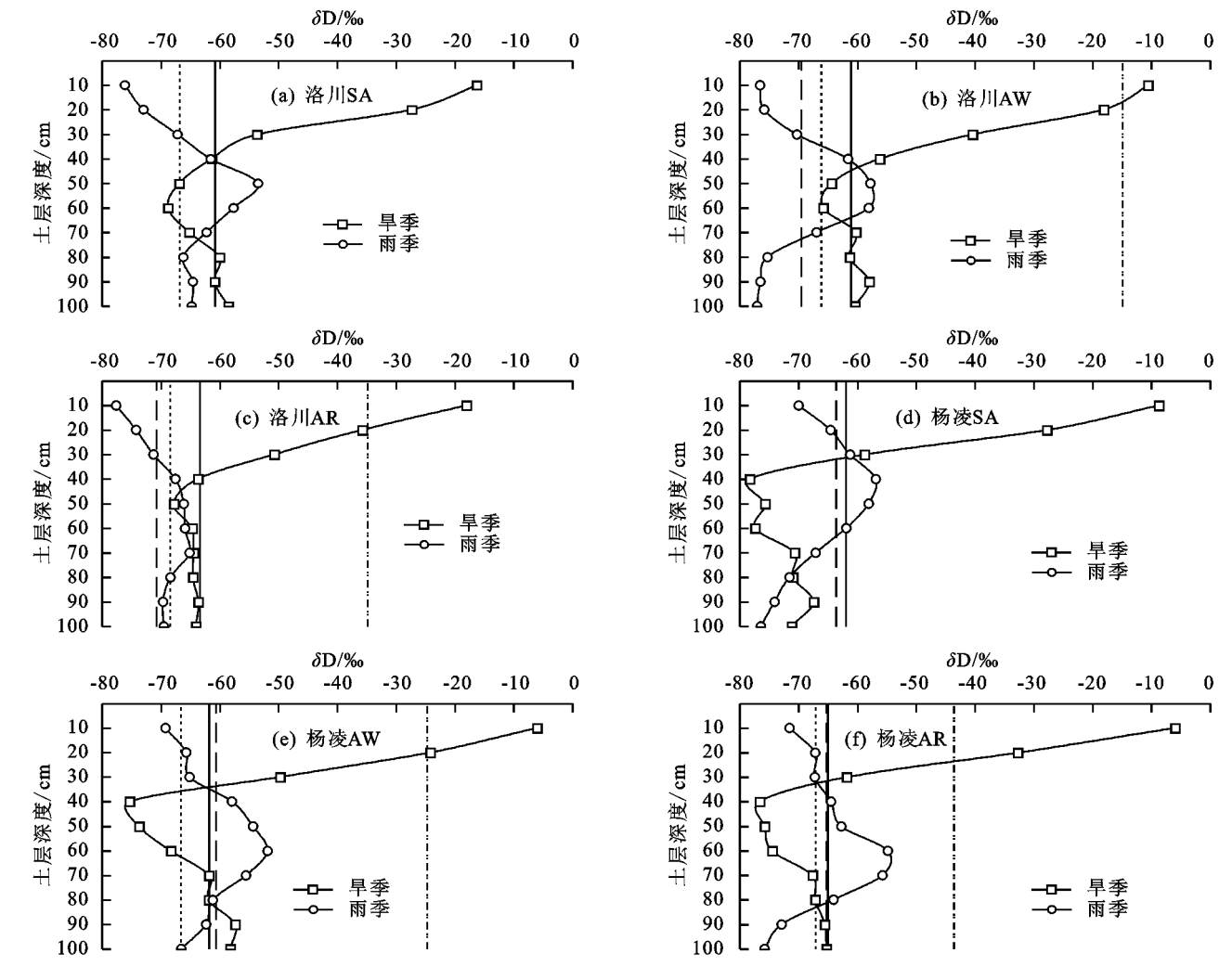
2.3 直接对比法判断水分来源

将各系统的木质部和茎部水的同位素值与土壤水的同位素值作对比发现,2 个地样不同系统在不同季节的交点有所不同(图 5)。木质部水 δD 的交点主要在 20—100 cm,表明苹果树主要吸水来源中层和深层;牧草茎部水 δD 的交点主要在 0—40 cm,表明牧草吸水来源表层和中层。在旱季,洛川样地 3 个系统苹果在 40—50,70—100 cm 间至少有 2 个交点;杨

凌样地 SA 苹果在 30—40 cm 有 1 个交点,而复合系统在 30—40,70—100 cm 各有 1 个交点,表明苹果树水分来源于多个土层,直接对比法难以准确判断主要水分来源。洛川样地牧草的交点在 0—20 cm,杨凌牧草交点在 20—30 cm,杨凌牧草交点较洛川更深,两地各系统同位素最小值主要在 40—60 cm,通过直接对比法可以得出,旱季牧草水分主要来源于表层和中层,深层土壤对牧草水分的贡献最低。由于雨季降雨增多,带来的同位

素信息,使木质部和茎水同位素贫化,洛川样地较杨凌样地更为明显。洛川样地木质部交点在 30,70—90 cm,牧草的交点在 30—40 cm;杨凌样地木质部交点在 20—

40,60—80 cm,牧草的交点在 10—20,80—100 cm,样地内各系统木质部交点深浅变化基本一致,且交点均不只 1 个,杨凌牧草交点较洛川牧草交点更浅。



注:实线、长划线、双点划线、短点线分别为旱季苹果木质部、雨季苹果木质部、旱季牧草茎、雨季牧草茎 δD 值。

图 5 不同生境下土壤水、木质部水和茎部水的 δD 值比较

2.4 定量分析苹果树和牧草水分利用比例

当植物水同位素与土壤水同位素交点不止 1 个时,直接对比法不能确定植物主要水分来源。此时,采用 IsoSource 模型不仅能确定植物主要吸水层位,还能量化植物对土壤水的利用程度。经过 IsoSource 模型计算表明,不同生境下各系统植物主要水分来源有所差异(图 6),随着雨季的到来,各系统植物对土壤水的利用策略发生不同程度改变。在旱季,洛川样地苹果树所需水分主要来源于 40—100 cm 土层,尤其是 AR 果树对深层土壤水的利用比例达到 96.0%,而对 0—20 cm 土层水分的利用极低。相比杨凌样地果树对 40—100 cm 土层土壤水的利用较洛川样地低,利用程度最高的是 AR,利用比例为 65.0%,SA 和 AW 的果树主要利用 20—40 cm 土层,利用比例分别为 54.3%,54.5%。牧草的主要利用 0—20 cm

土层,利用比例为 59.3% 以上,但杨凌样地 AR 的黑麦草主要利用 20—40 cm 土层,利用比例为 62.2%。

随着降水的补给,各土层含水量提高。洛川样地 SA 改变吸水策略,由深层转换到中层,复合系统依旧主要利用深层土壤水,但利用比例降低,AR 和 AW 苹果树利用比例为 68.7% 和 43.1%,但对 20—40 cm 土层的利用比例明显提高。雨季,牧草从表层转换到中层,尤其是黑麦草对中层土壤水的利用比例达 92.0%。此时,杨凌样地苹果树和牧草的水分利用策略却与洛川样地不同,SA 和旱季一样依旧利用中层土壤水,但对表层的利用比例也明显提高;AR 依旧利用 40—100 cm 土层土壤水,但对 20—40 cm 土层的利用比例从旱季的 16.0% 提升到 33.7%,而 AW 的苹果却加大对深层土壤水的利用。牧草随着表层土壤水的增多转而加大对表层的利用,尤其是黑麦草转换利用策略改为主要利用表层土壤水。

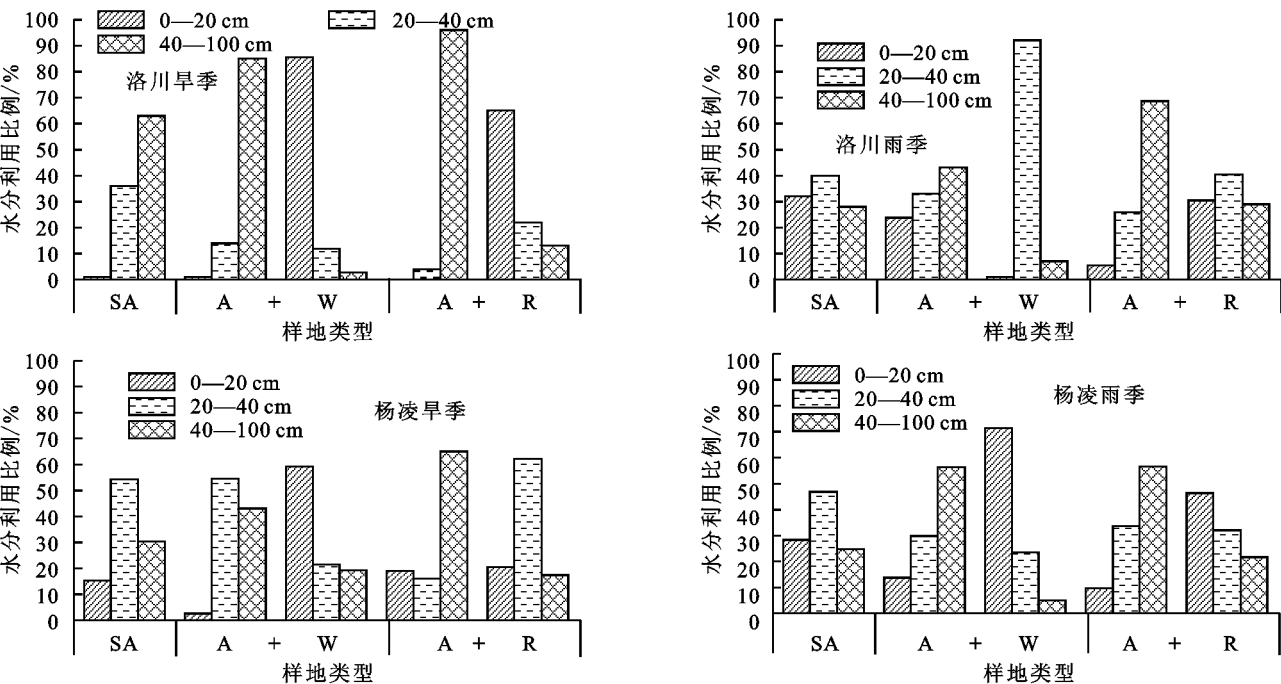


图 6 不同生境下植物对不同水分来源的利用比例

3 讨论

不同生境下,果草复合系统可随季节变化调整水分利用策略,其在洛川地区对水分变化的响应更快,对环境异质的适应性较杨凌更强。当土壤水分不足时,果树主要水分来源层位比水分充足时更深,牧草主要利用浅表层水分^[11]。5月SA和AW深层土壤有水分亏缺现象,尤其是杨凌样地SA平均含水量高于AW,说明旱季果园种植白三叶会加大土壤水分消耗,可能存在争水现象,且杨凌样地更为明显,李同川等^[12]在黄土高原对果园生草地旱季土壤水分研究中发现,进入5月苹果园裸地含水量高于生草地的趋势,可能是5月温度高降水少,牧草生长旺盛,苹果处于幼果生长期,植物对水分需求大。已有研究^[13]表明,黑麦草、白三叶60%~65%的根系分布在20—40cm土层,黑麦草根系生物量在0—30cm土层大于白三叶,牧草随着种植年限的增加,根系延伸至40—80cm土层,增加该层水分交换活跃度。本研究中AR较AW表现出更好的适应性,深土层含水量相对稳定,对水分调蓄能力明显高于白三叶,这与赵政阳等^[14]的黑麦草调蓄作用比白三叶显著的结论一致。所有系统中AR平均含水量最高,且在旱季时与AW的变化趋势相反,表明种植黑麦草比白三叶更能改善土壤贮水能力^[13]。复合系统0—10cm土层土壤含水量高于SA(除洛川5月AR),表现出生草具有表层拦截雨水的现象,行间生草增强表层土壤蓄水量,且白三叶明显比黑麦草更佳。杨凌样地SA平均含水量在旱季时高于洛川样地,复合系统则低于洛川样

地,可能是处于生长旺盛期的牧草加大了杨凌样地果草复合系统的蒸散量,使其平均含水量降低,而雨季时复合系统却高于洛川样地,说明果草复合系统在旱季时会加大杨凌样地的土壤水分损耗,这与经历长期干旱后,牧草显著降低果园水分含量的结论一致^[15],这也可能与关中地区苹果园的年均蒸散量大于陕北地区有关^[16]。进入雨季,2个样地各个系统土壤水分都得到明显提高,尤其是复合系统显著高于单作系统,Palese等^[17]研究发现,意大利南部橄榄园的自发杂草植被覆盖与清耕相比,促进了降水的入渗,增加了深层土壤的水分含量。这可能是因为牧草根系生长增加了土壤有效孔隙度,促进了降水的入渗。

雨季时,降水带来同位素信息,表层同位素贫化,经雨水渗透作用,深土层同位素与雨水同位素混合后同位素有所减小,这与Tao等^[18]对黄土高原苹果树水分吸收的研究结果一致。果园0—40cm土层土壤水同位素变化范围较大,7、9月浅层土壤同位素贫化大于深层土壤,其原因可能是表层土壤 δD 与 $\delta^{18}O$ 值受降雨等外界因素直接影响明显,同位素变化大,而下层土壤受影响减小^[19]。不同生境下各系统土壤水 δD 与 $\delta^{18}O$ 值随土壤剖面的变化有所差异,因土壤水同位素自然丰度受降水、入渗、蒸发、温度、植被盖度、地形地貌等因素的影响^[20],致使旱季洛川样地土壤水 δD 与 $\delta^{18}O$ 值较杨凌样地偏大,雨季则相反。

植物对不同季节不同量级的降水利用敏感性不同,其氢、氧稳定同位素比率的响应也不同。苹果树和牧草通过吸收土壤水带来的稳定同位素信息,2个

样地果草复合系统中木质部和牧草茎 δD 值存在差异,并随着季节性波动,表明苹果树和牧草从不同土层中吸收水分,这与荒漠区不同生活型的植物主要利用土壤水,但其吸水层位均不同的结论一致^[7]。不同生活型的植物根系在土层中的分布不同,其对土壤水分的利用策略也不同。然而,同一物种在植物种类差异和生境中的环境因素影响下,根系在土壤中的布局不同,所需水分来源也有所不同。本研究发现,旱季洛川苹果树主要利用深层土壤水,表层土壤水利用率极低,而杨凌则不同,SA 和 AW 主要利用中层土壤水,已有研究^[21]表明,大多数根系只有在满足一定的水分条件时才能吸收水分,结合土壤含水量可发现,2 个系统在 60—80 cm 土层含水量较低,对苹果树而言,在不能受到深层土壤水补充时,选择吸收水分充足的上层土壤水,这种现象在刘柯渝^[22]的研究已有发现。也有研究^[23]表明,一些根系在浅层和深层土壤中均有分布的植物能够通过自身调节水分利用来源,在表层土壤含水量高或降水多时主要利用浅层土壤水,在降水少或表层土壤含水量低时转而利用深层土壤水。洛川样地的苹果树在旱季主要吸收深层土壤水,随着降水增加,浅层和中层土壤水分利用比例增加,尤其是 SA 改变策略主要利用中层土壤水,Liu 等^[8]在农林复合系统中研究发现,苹果树更倾向向水分含量较高的水源。而 AW 和 AR 中苹果树依然利用深层土壤水,可能与降水渗入后浅层水分增加,苹果树转向不同水源存在时间滞后,Wang 等^[24]研究黄土高原苹果树水分利用时也存在此现象。洛川样地 2 种牧草在雨季时转为利用中层土壤水,这与常恩浩等^[6]研究结果相似,白羊草群落在旱季主要利用 30—40 cm 土层水分,雨季时吸水深度上移至 0—20 cm 土层,旱季吸水层位较深,而雨季则吸收近地表水的结论不同,这可能与旱季表层土壤水分不足,部分浅表层须根死亡或活力降低有关。虽然 2 个样地牧草在水分利用策略和利用比例上存在差异,但是,牧草与果树水分来源层位并不重叠,这表明,在采样期间 2 个样地土壤水分是可以满足当前果园水分需求,果草复合系统并未发生水分竞争。王小龙等^[25]研究表明,果园行间种植黑麦草和紫花苜蓿可以增加葡萄根系长度和表面积,促进根系向深土层生长,且其增幅为黑麦草>紫花苜蓿>清耕。通过研究表明,不同生境下果草复合系统中果树和牧草均可以通过自身调节水分利用机制,减少因根系生态位重叠而造成水分竞争。

4 结论

(1)不同生境下,杨凌样地土壤含水量在垂直方

向上波动较洛川样地大。杨凌样地果草复合系统对土壤水分的消耗高于洛川样地,尤其种植白三叶在旱季会加大深层土壤水的消耗。雨季时,复合系统对土壤有蓄水作用,且杨凌地区较洛川更佳。

(2)不同生境下,土壤水 δD 与 $\delta^{18}O$ 值呈季节性变化,且 2 个样地各系统间的变化趋势相似。

(3)旱季时,洛川地区果树吸水层位较杨凌更深,对深层土壤水利用比例更高。洛川样地和杨凌样地 AR 果树主要利用土壤水深度为 40—100 cm,杨凌样地 SA 和 AW 果树为 20—40 cm。洛川样地牧草主要利用 0—20 cm 土层土壤水;杨凌样地白三叶和黑麦草分别为 0—20,20—40 cm。雨季时,2 个样地果树水分来源层位相同,SA 主要利用 20—40 cm,AW 和 AR 主要利用 40—100 cm。牧草介入使果树吸水层位下移,避免与牧草水分来源层位重叠造成的水分竞争。复合系统内植物可随季节变化调整水分利用策略,洛川果草复合系统在水分不足时拓宽吸水层位,对生境异质适应机制较杨凌好。

致谢:特别感谢西北农林科技大学延安市洛川苹果试验站和陕西杨凌国际合作科技园—现代农业创新园为本研究提供平台。

参考文献:

- [1] Uliarte E M, Schultz H R, Frings C, et al. Seasonal dynamics of CO_2 balance and water consumption of C_3 and C_4 -type cover crops compared to bare soil in a suitability study for their use in vineyards in Germany and Argentina[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013,181:1-16.
- [2] Huang J, Wang J, Zhao X N, et al. Effects of permanent ground cover on soil moisture in jujube orchards under sloping ground: A simulation study[J]. *Agricultural Water Management*, 2014,138:68-77.
- [3] 史进,李文胜,张俊苗.生草栽培对果园生态环境和果实品质的影响[J].*新疆农业科学*, 2016,53(4):647-654.
- [4] Cao Q, Wang Z K, Yang X L, et al. The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China[J].*Soil and Tillage Research*, 2021,205:e104788.
- [5] 朱金方,刘京涛,孙景宽,等.贝壳堤岛不同生境下柽柳水分来源比较[J].*生态学杂志*, 2017,36(8):2367-2374.
- [6] 常恩浩,李鹏,张铁钢,等.旱季雨季对黄土丘陵退耕区植被根系分布及水分利用的影响[J].*农业工程学报*, 2016,32(24):129-138.
- [7] 彭丽萍,戴岳,师庆东.新疆准东荒漠区 5 种典型植物水

- 分来源[J].干旱区研究,2018,35(5):1146-1152.
- [8] Liu Z Q, Jia G D, Yu X X. Water uptake and WUE of Apple tree-Corn Agroforestry in the Loess hilly region of China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 234:e106138.
- [9] Chen G, Liu S B, Xiang Y Z, et al. Impact of living mulch on soil C : N : P stoichiometry in orchards across China: A meta-analysis examining climatic, edaphic, and biotic dependency[J].Pedosphere,2020,30(2):181-189.
- [10] Wang Y J, Liu L, Tian Y L, et al. Temporal and spatial variation of soil microorganisms and nutrient under white clover cover[J].Soil and Tillage Research,2020, 202:e104666.
- [11] 何春霞,陈平,孟平,等.华北低丘山区果药复合系统种间水分利用策略[J].植物生态学报,2016,40(2):151-164.
- [12] 李同川,李会科,郭宏,等.渭北黄土高原果园生草地旱季土壤水分特征研究[J].水土保持研究,2014,21(1): 29-33,38.
- [13] 张先来,李会科,张广军,等.种植不同牧草对渭北苹果园土壤水分影响的初步分析[J].西北林学院学报, 2005,20(3):56-59.
- [14] 赵政阳,李会科.黄土高原旱地苹果园生草对土壤水分的影响[J].园艺学报,2006,33(3):481-484.
- [15] 曹铨,王自奎,沈禹颖.陇东苹果园生草复合体系土壤水分季节动态[J].干旱区研究,2019,36(1):77-84.
- [16] 郭复兴,常天然,林瑒焱,等.陕西不同区域苹果林土壤水分动态和水分生产力模拟[J].应用生态学报,2019, 30(2):379-390.
- [17] Palese A M, Vignozzi N, Celano G, et al. Influence of soil management on soil physical characteristics and water storage in a mature rainfed olive orchard[J].Soil and Tillage Research,2014,144:96-109.
- [18] Tao Z, Neil E, Si B C. Determining deep root water uptake patterns with tree age in the Chinese loess area [J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: e106810.
- [19] 王锐,刘文兆,宋献方.黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究[J].水土保持学报,2014,28(3): 134-137,184.
- [20] 徐英德,汪景宽,高晓丹,等.氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展[J].水土保持学报,2018,32 (3):1-9,15.
- [21] María P, Coomans O, Urcelay C, et al. Isotope fractionation during root water uptake by *Acacia caven* is enhanced by arbuscular mycorrhizas [J]. Plant Soil, 2019,441(1/2):485-497.
- [22] 刘柯渝.深层土壤水对黄土塬区苹果蒸腾的贡献[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [23] Gao X D, Liu Z P, Zhao X N, et al. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,265:444-453.
- [24] Wang S F, An J, Zhao X N, et al. Age-and climate-related water use patterns of apple trees on China's Loess Plateau [J].Journal of Hydrology,2020,582:e124462.
- [25] 王小龙,刘凤之,史祥宾,等.行内生草对葡萄根系生长和土壤营养状况的影响[J].华北农学报,2018,33(增刊 1):230-237.
- (上接第 85 页)
- [18] Zhang Q, Zhou Y, Singh V P, et al. Comparison of de-trending methods for fluctuation analysis in hydrology[J]. Journal of Hydrology,2011,400(1/2):121-132.
- [19] Zhang T, Shen S, Cheng C X. Impact of radiations on the long-range correlation of soil moisture: A case study of the A'rou superstation in the Heihe River Basin[J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(9): 1491-1506.
- [20] 王贺年,余新晓.北京山区林地土壤水分时间序列分析 [J].山地学报,2012,30(5):550-554.
- [21] 毕彪,钱云楷,艾宪峰,等.基于 HYDRUS-1D 模拟的降雨入渗条件下 VG 模型参数敏感性分析[J].长江科学院院报,2021,38(7):36-41.
- [22] 牛晓彤,刘目兴,易军,等.三峡山地土壤水分特征曲线及模型拟合[J].灌溉排水学报,2017,36(9):75-80.
- [23] Wang T. Modeling the impacts of soil hydraulic properties on temporal stability of soil moisture under a semi-arid climate[J].Journal of Hydrology,2014,519: 1214-1224.
- [24] 陈卫金,程东会,陶伟.Van Genuchten 模型参数的物理意义[J].水文地质工程地质,2017,44(6):147-153.
- [25] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.