

2026 年度陕西省科学技术奖拟提名项目公示内容

（自然科学奖）

一、项目名称：西北半干旱区作物水分高效利用的生理机制解析

二、提名者：榆林市人民政府

提名意见：

本项目聚焦西北半干旱区有限水分条件下作物节水与高产难以协同的基础科学问题，围绕作物如何协调根—冠水分获取、运输与消耗并维持光合碳同化，开展了长期系统研究。揭示了“水分平衡—光合维持”协同决定作物高效用水的根—冠水碳机制，阐明了营养与激素信号调控根系吸水、维持整株水分平衡的机理，在此基础上进一步回答了“根系是否越大越好”的科学问题，提出并验证了“适度根量—高根效”的作物资源高效利用新认识，形成了“高效用水碳同化路径解析—整株水分主动调控—根系资源优化配置”逐级深化的理论体系，推动作物抗旱研究由单纯强调“多吸水”或“少耗水”转向根—冠水碳协同和资源投入效率的综合考量。相关成果发表于 *The Crop Journal*、*Field Crops Research*、*Plant Physiology and Biochemistry* 等期刊，被 *Nature Reviews Earth & Environment*、*Plant, Cell & Environment*、*New Phytologist* 等国际期刊广泛引用，5 篇代表作累计他引 519 次。成果为旱区作物抗旱节水生理评价、根系性状优化及水资源高效利用提供了重要理论依据，具有明显的原创性、系统性和科学价值。提名者认真审阅了项目材料，成果材料齐全、内容真实、符合规范，完成人排名无异议，符合陕西省自然科学奖提名条件，提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介：

西北半干旱区水分供给总量有限，且年际和季节分配极不均匀，作物生育过程常处于水分供给与需水关键期不匹配的状态。干旱条件下，植物通常通过降低气孔导度和蒸腾减少失水，但气孔关闭同时限制了 CO_2 进入和光合碳同化；反之，若维持较高蒸腾和光合，又会加速土壤水分的消耗。因此，旱区作物高效用水的关键不在于单纯‘多吸水’或‘少耗水’，而在于有限水分条件下如何维持相对稳定的整株水分收支，同时保障光合碳输入和产量形成。水分平衡与碳同化的矛盾由此成为本项目长期关注的核心问题。

围绕这一核心问题，项目组沿着‘认识高效用水所需的生理状态—探索维持水分平衡的主动调控途径—优化根系资源配置方式’这条主线，逐层推进。研究首先以冠层节水和光合维持的协同关系为切入点，明确了高水分利用效率需要在减少非生产耗水的同时保障有效碳同化；随后将重点由地上部转向地下部，探究根系供水能力能否受营养和激素信号的主动调节，从而维持根—冠间的水分平衡；在明确根系供水功能的关键作用后，进一步追问提高供水和资源获取能力是否必须依赖更大的根系，将关注点由‘根量多少’深化为‘根量与根效’的优化配置。围绕上述研究过程，项目取得以下重要科学发现：

（一）发现了气孔适度节水与穗部光合补偿的协同效应，阐明了水分平衡与光合维持

协同决定作物高效用水的根—冠水碳机制，深化了对作物高效用水生理基础的认识。本项目长期研究表明，作物水分利用效率的提高不依赖水分消耗的同步增加，而是通过提高单位水分的碳同化效率和产量形成能力来实现。在水分受限条件下，适度降低气孔导度和蒸腾减少非必要失水，但实现“节水”与“生产”相协调的关键，在于穗部等非叶绿色器官保持较强光合能力，对叶片光合受限形成有效补偿。同一旱地小麦品种演替体系的根系研究表明，不同年代品种根系大小虽发生变化，但总耗水量并未同步增加，根系规模本身也不能稳定解释产量差异，说明 WUE 提升并非简单依赖扩大根系或增加耗水。因此，高效用水的目标状态并非追求最低蒸腾，而是使地下部水分获取、冠层耗水与绿色器官碳同化处于协调状态，使有限水分更多转化为籽粒碳输入和产量产出。

（二）阐明了矿质营养与激素信号对根系水力学导度的调控作用，揭示了根系主动供水与冠层耗水协同维持整株水分平衡的机制，拓展了对作物抗旱水分调控机制的认识。确认了“维持水分平衡同时保障光合”的目标状态，接下来的核心：水分平衡能否被主动调节。研究发现，Zn 能够调节根系水力响应及水通道蛋白相关过程，提高根系吸水 and 水分传输能力；MeJA 则通过调节 ABA 合成与稳态，增强根系吸水，并使地下部供水与气孔行为、蒸腾和光合碳代谢相互匹配。两方面研究从营养调控和激素信号两个层面共同说明，根系水力并非干旱条件下的被动响应结果，而是可以主动调节的生理过程；抗旱性的提升也不仅依靠强化气孔关闭，还可以通过增强地下部供水来维持整株水分平衡。

（三）证实了根系规模与资源利用效率并非简单正相关，提出并验证了“适度根量—高根效”的根系资源优化配置原则，推动了作物根系研究由“根量扩增”向“根量—根效协同优化”新认识的转变。明确提高根系供水能力有利于维持整株水分平衡后，新的问题随之产生：根系供水功能增强是否意味着根越多越好？研究表明，根系规模与资源利用效率并非简单正相关。根量不足会限制水分和养分获取，但过大的根系需要更多光合同化物用于构建和维持，并可能加剧土壤水分的消耗。较小或适度的根系只要具有较高的单根系水力学导度，仍能够保障地上部资源供应，并维持较高水分利用效率和产量。由此提出并证实：根系资源配置存在“适度”原则，根系改良的重点应由单纯追求‘大根系’转向根量、单位根效、根冠比例和地下部碳成本的综合优化，从而形成对作物资源高效利用的新认识。

三项发现构成一个递进逻辑：首先回答“什么样的生理状态有利于高效用水、高效生产”，明确水分平衡与光合维持必须协同；继而回答“如何主动维持这一状态”，揭示营养和激素信号通过调节根系水力协调地下部供水与地上部耗水；最后回答“以什么样的根系配置更经济地实现这一状态”，提出“适度根量—高根效”的资源配置原则。

这一研究主线体现了从整株功能表型向调控机制、再向资源配置原则的逐层深化。发现一强调的是：高效用水必须同时满足水分收支相对稳定和碳同化持续；发现二揭示的是：通过调节根系水力和化学信号，可以主动改变地下部供水能力，使其与地上部耗水相适应；发现三回答的是：根系功能增强并不意味着一味增加根量，而是通过提高单位根系功能降低不必要的地下部碳消耗。三者共同把作物抗旱研究从单纯讨论“耐不耐旱”，推进到讨论水、碳和养分在根—冠之间如何高效配置与转化。

从科学认识上看，本项目把传统相对分散的气孔节水、根系吸水、激素抗旱和根系构型

研究整合至同一条水分平衡主线上。气孔调节决定冠层耗水强度，绿色器官光合决定有限水分能够获得的碳收益，根系水力决定地下部供水能力，营养和激素信号决定上述过程能否动态协调，而根量与根效则决定为获得这种供水能力所需付出的地下部碳成本。因此，项目最终形成的并非若干独立性状的简单组合，而是围绕‘有限水分如何获得更高生产收益’这一核心命题，对整株资源优化配置的系统性再认识。

项目代表性成果由 5 篇论文构成，累计他引 519 次。相关成果被 *Nature Reviews Earth & Environment*、*Plant, Cell & Environment*、*New Phytologist*、*Plant Physiology* 等国际重要期刊引用，并被用于气候变化下作物适应、非叶绿色器官光合、根系水力及根系资源配置等研究。其中，关于“气孔适度节水—穗部光合补偿”的研究被 *Nature Reviews Earth & Environment* 纳入气候变化影响作物产量与适应机制的综合知识体系，并被 *New Phytologist* 和 *Journal of Experimental Botany* 用于阐释非叶绿色器官光合及小麦产量形成；关于 Zn 调控根系水力的成果被 *Plant Physiology* 用于根系水力结构及微量元素调控水分运输研究；MeJA—ABA 调控根系吸水与水分状态的机制被国际植物激素与逆境生理综述采用；“适度根量—高根效”认识被我国高产小麦品种根系研究及 *Plant and Soil* 相关研究引用。上述同行引用从不同侧面印证了三项科学发现的学术价值，为抗旱节水生理评价、根系性状优化及水资源高效利用提供了科学依据。

四、客观评价：

西北半干旱区作物生产面临的核心科学问题，是在水分供给有限条件下实现节水与高产的协同。项目围绕“如何在维持整株水分平衡的同时保障光合碳同化”这一主线，形成了“水分平衡与光合维持协同—根系供水主动调控—根量与根效优化配置”逐级深化的三项科学发现。5 篇代表性论文共被引 548 次，累计他引 519 次，其中代表作 1 入选农业科学前 1% 高被引论文。相关成果得到中国工程院院士康绍忠、许为钢，法国科学院院士 Christophe Maurel，美国科学促进会会士 Senthild Asseng，国际实验生物学学会前主席 Tracy Lawson，美国农学会和美国作物科学学会会士 Matthew Reynolds，以及澳大利亚技术科学与工程院院士、世界科学院院士 Kadambot H. M. Siddique 等国内外同行引用。

（一）关于“水分平衡—光合维持”协同决定作物高效用水的根—冠水碳机制。相关成果被 *Nature Reviews Earth & Environment*、*Plant, Cell & Environment*、*New Phytologist* 和 *Journal of Experimental Botany* 等国际重要期刊引用。慕尼黑工业大学 Senthild Asseng 等在 *Nature Reviews Earth & Environment* 发表综述，将本项目“降低气孔导度和蒸腾、同时维持较高穗部光合以提高水分利用效率”的研究纳入全球气候变化影响作物产量与适应机制的综合知识体系。中国工程院院士中国农业大学康绍忠教授团队在 *Plant, Cell & Environment* 发表论文，将代表作 1 用于讨论气孔结构、气孔导度与作物水分利用的关系，独立引用支持了“气孔并非越关闭越好，而应通过适度调节减少非必要蒸腾”的认识。国际实验生物学学会前主席 Tracy Lawson 教授团队在 *New Phytologist* 讨论小麦穗部等非叶绿色器官光合作用及其对整体碳获取的贡献，并将代表作 1 列为重要依据，该引用从独立研究角度支持了穗部等非叶绿色器官参与整体碳获取的认识。CIMMYT 小麦生理学家 Matthew Reynolds 等在 *Journal*

of Experimental Botany 撰文将穗部光合纳入小麦产量潜力的源—库性状网络；澳大利亚技术科学与工程院院士、世界科学院院士 Kadambot H. M. Siddique 团队引用代表作 2 研究不同年代小麦品种的产量形成与遗传进展。这些独立引用说明，本项目关于“有限耗水条件下维持碳同化和产量形成”的研究结果已被用于作物抗旱、光合增产和长期遗传改良等相关研究讨论。从引用层级看，代表作 1 不仅被用于解释抗旱条件下的气孔调控和非叶绿色器官光合，还被进一步纳入气候变化适应与小麦产量潜力研究，说明该成果已从单一生理现象拓展为连接水分消耗、碳同化与产量形成的重要机制证据；代表作 2 关于长期品种改良的研究又从遗传改良尺度提供了独立旁证，使“水分平衡与光合维持协同”的认识获得了器官生理与品种演替两个层面的同行支撑。

（二）关于矿质营养与激素信号调控根系水力、维持整株水分平衡的机制。相关成果被 Plant Physiology、Journal of Experimental Botany 和 Environmental and Experimental Botany 等期刊引用。法国科学院院士 Christophe Maurel 团队在 Plant Physiology 发文建立玉米根系水力结构研究框架时，将代表作 3 列为根系响应非生物胁迫的重要前期研究之一，并进一步分析根系结构、水力能力、水通道蛋白活性与吸水策略之间的关系。法国 Aix-Marseille 大学与德国 IPK 植物矿质营养研究团队在 Journal of Experimental Botany 综述微量金属对植物水分运输的调控时，将代表作 3 作为水通道蛋白响应金属元素供应的直接依据之一，说明本项目把 Zn 作用由传统养分供给拓展到根系水力功能调节的认识已被国际综述采用。Kadambot H. M. Siddique 团队在相关综述中引用代表作 4，概括 MeJA 通过 ABA 相关代谢调节气孔导度、植株水分状态和抗旱性的研究结果。这些评价从根系水力、矿质营养和激素调控不同角度支持了本项目“主动增强地下部供水—协调地上部耗水—维持整株水分平衡”的机制认识。上述引用具有较强的交叉验证特征：Maurel 团队从根系水力结构和水通道蛋白角度采用代表作 3，矿质营养领域综述从 Zn 调控水分运输角度引用同一成果，激素与逆境生理综述则从 MeJA—ABA 调节植株水分状态角度采用代表作 4。不同研究方向对两类代表作的独立引用，共同支持了“根系供水能力可以被主动调控，并与冠层耗水相协调”的科学认识，也体现了该发现由单一因子效应向整株水分平衡机制的学术拓展。

（三）关于“适度根量—高根效”的作物资源高效利用新认识。相关成果被中国工程院院士河南农业大学许为钢教授团队及 Kadambot H. M. Siddique 团队重点引用。许为钢团队在解析高产、节肥、高效小麦品种“郑麦 1860”的根系结构与养分高效性状时，引用代表作 5 关于根系大小与根系效率的研究，用于说明根系规模不能单独决定资源获取能力，单位根系吸水、吸氮效率同样重要，使本项目“根量—根效”认识与我国高效小麦品种研究相衔接。Kadambot H. M. Siddique 团队在研究不同年代冬小麦根系配置与 WUE 形成机制时，引用代表作 5 关于根系大小、根系效率及水氮利用关系的研究，提出根系性状对 WUE 的贡献取决于根系分布和功能，而非简单追求根量增加，与本项目“适度根量—高根效—根冠协调”的科学认识一致。两类同行研究分别从我国高效小麦品种和不同年代品种的根系配置出发，对“根量不是唯一决定因素、根系功能效率同样关键”的认识进行了独立应用和验证，说明“适度根量—高根效”并非局限于特定材料或单一试验条件，而具有解释不同遗传背景下资

源获取与利用效率差异的理论价值。相关引用也表明，根系研究的评价重点正在由单纯关注根系规模，逐步转向兼顾根系分布、单位根效和根冠协调的综合功能评价。

总体上，国内外同行对三项科学发现的引用呈现出由“气孔节水与光合维持”向“根系水力主动调控”，再向“根量与根效优化配置”逐步拓展的特点。这些独立引用表明，本项目形成的连续科学认识已进入作物水分生理、根系水力和资源高效利用等研究体系，并对抗旱节水生理评价、根系性状优化及水资源高效利用产生了持续学术影响。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条。其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内坐着	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat	The Crop Journal	Yuping Li; Hongbin Li; Yuanyuan Li; Suiqi Zhang	2017 年 5 卷 231–239 页	2017 年 1 月 7 日	Suiqi Zhang	Yuping Li; Hongbin Li	李玉萍、李红兵、李媛媛、张岁岐	314	SC I+ CN KI +E SC I	是
2	Changes in the yield and associated photosynthetic traits of dry-land winter wheat	Field Crops Research	Yingying Sun; Xiaolin Wang; Nan Wang; Yinglong	2014 年 167 卷 1–10 页	2014 年 6 月 26 日	Suiqi Zhang	Yingying Sun	孙婴婴、王小林、王楠、陈应	124	SC I+ CN KI +E SC I	是

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯 作者 (含 共 同)	第一 作者 (含 共 同)	国内 坐着	他 引 总 次 数	检 索 数 据 库	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
	(<i>Triticum aestivum</i> L.) from the 1940s to the 2010s in Shaanxi Province of China		g Chen; Suiqi Zhang					龙、张岁岐			
3	Zinc regulates the hydraulic response of maize root under water stress conditions	Plant Physiology and Biochemistry	Li Zhang; Minfei Yan; Yuanyuan Ren; Yinglong Chen; Suiqi Zhang	2021年159卷123-134页	2021年2月1日	Suiqi Zhang	Li Zhang	张莉、闫敏飞、任圆圆、陈应龙、张岁岐	32	SC I+ CN KI +E SC I	是
4	Abscissic acid synthesis and root water uptake contribute to exogenous methyl jasmonate-induced improved tomato drought resistance	Plant Biotechnology Reports	Jiakun Yan; Haipeng Li; Yu Li; Nan Zhang; Suiqi Zhang	2022年16卷183-193页	2022年3月14日	Jiakun Yan	Jiakun Yan	严加坤、栗海鹏、李玉、张楠、张岁岐	35	SC I+ CN KI +E SC I	是

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯 作者 (含 共 同)	第一 作者 (含 共 同)	国内 坐着	他 引 总 次 数	检 索 数 据 库	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
5	The role of root size and root efficiency in grain production, and water- and nitrogen-use efficiency in wheat	Journal of the Science of Food and Agriculture	Minfei Yan; Huida Lian; Cong Zhang; Yinglong Chen; Huanjie Cai; Suiqi Zhang	2023 年 103 卷 7083- 7094 页	2023 年 7 月 3 日	Suiqi Zhang	Minfei Yan	闫敏飞、连慧达、张聪、陈应龙、蔡焕杰、张岁岐	14	SC I+ CN KI +E SC I	是

六、主要完成人情况

排名	姓名	行政/技术 职称	工作单位/完成 单位	对本项目主要学术贡献
1	严加坤	副院长、 教授	榆林大学/榆林 大学	作为本项目第一完成人，严加坤围绕“如何主动维持整株水分平衡”这一关键科学问题，重点开展植物激素调控根系吸水与抗旱机制研究，并在团队研究传承中发挥承上启下作用，参与前期研究、后续试验及论文讨论。作为代表性论文4第一作者、通讯作者，主导科学问题凝练、试验组织、数据解析与机制总结，揭示 MeJA 通过调节 ABA 合成与稳态增强根系吸水，协调气孔、蒸腾与光合碳代谢，建立“激素信号—根系供水—冠层耗水—碳同化”调控链，直接支撑科学发现二；并参与三项发现的逻辑整合，推动形成“水分平衡与光合维持—根系供水主动调控—根量与根效优化配置”的递进认识。

排名	姓名	行政/技术职称	工作单位/完成单位	对本项目主要学术贡献
2	李红兵	副研究员	西北农林科技大学/西北农林科技大学	作为张岁岐实验室专职科研人员，长期参与作物抗旱生理与水分高效利用研究。围绕小麦气孔调节、蒸腾与穗部光合开展工作，是代表性论文 1 共同第一作者，参与揭示耐旱小麦通过适度降低气孔导度和蒸腾、同时维持较高穗部光合实现水分利用效率提高的生理基础，对科学发现一做出重要贡献。
3	孙婴婴	地建研究院副院长、教授级高级工程师	陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司	主要开展旱地作物长期品种演替、产量形成、光合性状与水分利用效率研究，是代表性论文 2 第一作者。相关研究从长期遗传改良尺度揭示在耗水未同步增加条件下提高光合与产量形成效率的规律，并在地建科研平台继续开展旱地小麦根系性状、耗水与 WUE 研究，为“水分平衡—光合维持”及“适度根量—高根效”认识提供了延伸证据。
4	张岁岐	研究员	西北农林科技大学/西北农林科技大学	项目长期研究的主要学术组织者和指导者。持续从事作物抗旱生理生态、根系吸水和有限水分高效利用研究，系统组织并指导水碳协同、根系水力调控和根量—根效关系研究；为代表性论文 1、2、3、5 的通讯作者，对项目科学问题凝练、研究体系形成和三项科学发现的理论提升做出核心贡献。
5	闫敏飞	讲师	咸阳师范学院/西北农林科技大学	主要开展根系水力传导、矿质营养调控及根量—根效关系研究。作为代表性论文 3 共同作者，参与揭示 Zn 通过水通道蛋白相关过程增强根系水力传导、改善整株水分状态的机制；作为代表性论文 5 第一作者，系统比较不同根系规模材料的水氮获取与产量形成，提出根系大小不能单独决定资源利用效率，为“适度根量—高根效”新认识提供直接证据。

七、主要完成单位情况

排名	单位名称	对本项目主要学术贡献
1	榆林大学	作为项目第一完成单位，为第一完成人持续开展旱区作物水分高效利用研究提供科研平台、实验条件和项目支持。重点支撑了 MeJA—ABA 调控根系吸水、气孔行为和整株水分状态研究，以及项目后续对根—冠水分平衡、抗旱节水生理和资源高效利用科学认识的凝练与拓展；为代表性论文 4 及相关延伸研究的完成提供了重要条件。
2	西北农林科技大学	作为项目核心基础研究平台，长期支撑张岁岐团队围绕旱地作物抗旱生理、根系吸水、水分利用效率和水氮高效利用开展系统研究。依托相关实验室和科研条件，完成了旱地小麦长期品种演替、气孔节水与穗部光合补偿、Zn 调控根系水力以及根量—根效关系等研究，是代表性论文 1、2、3、5 的主要支撑单位，为三项科学发现的形成提供了连续研究基础。
3	陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司	依托陕西地建土地工程技术研究院相关科研平台，为孙婴婴持续开展旱地作物根系性状、耗水和水分利用效率研究提供科研条件与数据支撑。相关延伸研究从长期品种演替和土地工程实践尺度表明，根系大小变化并不必然带来全生育期耗水增加，现代品种 WUE 提升与根系功能及资源配置优化密切相关，从独立研究尺度补充了项目“水分平衡—光合维持”和“适度根量—高根效”的科学证据链。

八、完成人合作关系说明（合作方式包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等）

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	论文合著/师生合作	严加坤 1、张岁岐 4	2013 年 8 月 25 日	2023 年 7 月 3 日	代表性论文 4；围绕 JA/ABA、根系吸水和整株水分平衡开展连续研究	代表性论文 4

2	论文 合著 /师 生合 作	孙婴婴 3、张岁 岐 4	2010 年 1 月 1 日	2020 年 3 月 24 日	代表性论文 2；开展旱 地小麦品种 演替、产量 与光合性状 研究	代表性论文 2
3	论文 合著 /课 题组 合作	李红兵 2、张岁 岐 4	2011 年 4 月 1 日	2023 年 7 月 3 日	代表性论文 1；开展气 孔调节、蒸 腾与穗部光 合研究	代表性论文 1
4	论文 合著 /师 生合 作	张岁岐 4、闫敏 飞 5	2016 年 9 月 1 日	2023 年 7 月 3 日	代表性论文 3、5；开展 Zn 调控根 系水力及根 量—根效研 究	代表性论文 3、5
5	同属 课题 组/ 学术 传承	严加坤 1、李红 兵 2、孙 婴婴 3、 闫敏飞 5、张岁 岐 4	2010 年 1 月 1 日	2023 年 7 月 3 日	围绕旱地作 物水分高效 利用形成连 续博士研究 链条	代表性论文 1—5

完成人合作关系说明（限 1000 字）：

本项目 5 位完成人围绕“西北半干旱区作物水分高效利用的生理机制”这一主题，以张岁岐研究员长期开展的作物抗旱生理、根系吸水与有限水分高效利用研究为学术主线，通过师生培养、论文合著、同一课题组研究、实验平台与方法共享等方式形成了长期、连续的合作关系。张岁岐研究员为项目主要学术组织者和指导者。孙婴婴于 2009—2014 年在张岁岐实验室攻读博士学位，完成旱地小麦品种演替、产量和光合性状研究，形成代表性论文 2；严加坤于 2013—2017 年在张岁岐实验室攻读博士学位，围绕根系吸水、JA/ABA 信号与整株水分平衡开展研究，后续形成代表性论文 4；闫敏飞于 2016—2023 年在张岁岐实验室攻读博士学位，先后参与 Zn 调控根系水力研究并系统开展根量—根效与水氮利用研究，形成代表

性论文 3 和 5。李红兵作为张岁岐实验室专职科研人员，长期参与作物抗旱与高效用水研究，与张岁岐共同指导和支撑团队实验工作，是代表性论文 1 共同第一作者。上述合作在时间上前后衔接、研究内容上逐级深入：由“水分平衡与光合维持”认识，进一步追问“如何主动调控根系供水”，再延伸至“什么样的根系配置更经济高效”，最终形成“水分平衡与光合维持协同—根系供水主动调控—适度根量与高根效优化配置”的连续科学认识。孙婴婴在陕西地建科研平台开展的后续旱地作物根系与 WUE 研究，又从长期品种演替和土地工程尺度补充了团队研究证据。全体完成人合作关系真实、研究脉络清晰，相关成果均可由代表性论文及公开发表研究予以印证。