

卢慧, 余涛, 赵万伏, 等. 土壤-葡萄体系中重金属的迁移富集与风险评估研究进展[J]. 岩矿测试, 2024, 43(6): 982–996. DOI: [10.15898/j.ykcs.202404280102](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202404280102).

LU Hui, YU Tao, ZHAO Wanfu, et al. Research Progress on the Migration, Enrichment and Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Grape System[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(6): 982–996. DOI: [10.15898/j.ykcs.202404280102](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202404280102).

土壤-葡萄体系中重金属的迁移富集与风险评估研究进展

卢慧¹, 余涛^{1,2*}, 赵万伏³, 温晴¹, 汤奇峰², 李畅^{1,2}, 张力月¹, 侯青叶^{2,4}, 杨忠芳^{2,4}

1. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083;
2. 自然资源部生态地球化学重点实验室, 北京 100037;
3. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 宁夏 银川 750002;
4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 重金属元素作为潜在有毒元素, 在葡萄园土壤中的污染水平直接影响生态系统平衡及人类健康。本文通过对国内外现有研究的分析, 着重探讨了葡萄园土壤-葡萄体系中重金属的含量特征, 及其在体系中的迁移、富集行为和污染风险。结果显示, Cd、Cu、Zn 含量会对葡萄品质存在主要影响, 其余重金属须重点对照国标限量进行监测; 重金属由土壤向葡萄叶片的迁移率最高, 可达到向果实部分的 32 倍, 在迁移机制作用下积累水平多表现为: 叶片~根部>茎部>果实。其中 Zn 在叶片和根部中的积累量最高可分别达到 93mg/kg 和 51mg/kg, 显著高于果实中的积累量 0.53mg/kg。作为影响重金属迁移积累行为的关键因素, 土壤酸碱度与体系中重金属的生物可利用度呈负相关, 有机质含量通常与其呈正相关关系。当前进展还揭示了重金属因不同品种而产生的迁移差异性, 但针对不同气候条件、土壤类型及生理特性之间的影响机制仍缺乏系统性研究。建议今后需要基于区域环境特征, 全面地探究与重金属迁移能力及含量相关的影响因素, 以及构建机器学习模型预测和评估在不同污染水平下该体系中重金属之间产生的相互作用及其生态风险。

关键词: 土壤; 葡萄; 重金属元素; 迁移; 富集; 影响因素; 风险评估

要点:

- (1) 重金属在土壤-根、根-茎、茎-叶界面的迁移能力较强, 尤其在酸性土壤中表现明显, 而在茎-果界面迁移能力较弱, 直接导致了叶片与根系中积累水平较高。
- (2) 重金属迁移与积累受到土壤性质及葡萄品种的双重影响, 不同品种的富集能力和分配模式存在显著差异。
- (3) 借助多元统计、机器学习模型以及学科交叉技术, 从污染源、迁移富集特征等方面系统地预测、评估土壤-葡萄体系的潜在风险是今后研究趋势。

中图分类号: X825; X53

文献标识码: A

自 2011 年以来, 中国的葡萄产业发展迅速, 鲜食葡萄产量已稳居世界首位, 在 2014 年栽培面积已跃居全球第二位, 中国已经逐步成为世界葡萄生产大国^[1]。但相较于中国幅员辽阔的地域优势,

葡萄的栽培管理与技术仍存在诸多问题, 使得葡萄品质与世界先进水平还有一定的差距。究其原因, 在葡萄园中除了农药和营养液的喷洒, 土壤是葡萄吸收养分和微量元素的重要载体, 而其中存在的重

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-10-15; 接受日期: 2024-12-03; 网络出版日期: 2024-12-27

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20211414); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2022BEG03054); 科技部重点研发计划项目 (2022YFC3702301); 中国地质大学学科发展研究基金项目 (2023XK216)

第一作者: 卢慧, 硕士研究生, 化学专业, 主要从事环境中微量元素行为方面的研究。E-mail: luhui@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 余涛, 博士, 正高级实验师, 主要从事环境生态地球化学教学与科研工作。E-mail: yutao@cugb.edu.cn。

金属污染已经成为世界范围内农业安全生产的重点难题。已有的调查报告显示,全球超过 50% 的土地受到重金属或类金属污染^[2],在中国有 19.4% 的农业耕地重金属污染点位超标。随着时间而积累,其中一些重金属元素可以迁移至 100cm 以下^[3],破坏了土壤生态系统平衡^[4]。大多数重金属元素具有毒性、持久性、不能被微生物降解等特点,且不可避免地会通过土壤迁移至葡萄植株中,显著影响其正常生长及品质^[5]。研究表明,当重金属浓度超标时,会导致葡萄催化酶、抗氧化酶活性紊乱;以及对葡萄中的可溶性糖、蛋白质、维生素和可溶性固形物含量等指标产生不利影响^[6]。最终进入食物链后,还可能对人类健康构成威胁。因此,探究土壤-葡萄体系中重金属元素的存在状况与迁移富集机制,深入分析相关影响因素,对于有关部门划定葡萄中潜在有毒元素的含量标准,葡萄产地建立健康化、专业化的栽培模式,保障葡萄及其制品的质量安全,促进葡萄产业的可持续发展至关重要。

2014 年以来,国内外研究人员对受污染土壤中重金属的来源、空间分布、风险评估都进行了深入研究。据报道,金属冶炼厂以及矿产开发会导致表土中存在严重的重金属污染,生态风险较高;以及长期的农业活动、工业排放也会加剧土壤的重金属污染程度。近年来,重金属元素由农业土壤向作物的迁移转化及其生物可利用度研究逐渐成为热点^[7],但研究对象多集中于水稻、小麦、玉米等粮食作物。在葡萄园中的研究也大部分着重于对园区土壤中重金属含量的测定,而评估某种重金属与土壤环境质量、葡萄生长品质的关联程度等内容,调查较少且不系统。研究发现,重金属在土壤-葡萄体系中的生物可利用度以及迁移与积累过程较复杂,常会受到多种因素影响。例如, Yang 等^[8]认为体系中重金属的生物可利用度与土壤理化性质显著相关; Blotvogel 等^[9]研究得知葡萄植株对土壤溶液中金属元素的吸收取决于其在根际的浓度和形态、植株本身的营养状况,以及其他养分的可用性; Liu 等^[10]通过对比实验,验证了品种、水分胁迫和氮肥水平也会影响葡萄对重金属的吸收程度。因此,在研究结果中可能会出现不同产地、园区的葡萄植株中各部位重金属有效含量存在较大差异的情况。除此之外,不同提取方法对于体系中重金属元素的提取效果也显著不同,这对结果的准确性存在潜在影响^[11]。可见目前为止,各领域对于重金属在土壤-葡萄体系中的迁移与积累,及其相关的影响因素存

在着不同的认识与理解,研究工作的侧重点不同,还未形成全面的研究框架,仍需进行完善。

基于上述问题,本文分析了土壤-葡萄体系中重金属元素相关工作的研究进展,系统地从重金属元素的含量分布及影响因素、迁移与富集机制、污染风险评估方法这三个方面进行综述。并结合最新研究成果,对本领域研究工作中存在的问题和未来发展方向提出可行性建议。

1 土壤-葡萄体系中重金属含量分布及影响因素

1.1 重金属含量分布

土壤及葡萄组织中的重金属元素来源途径广泛,可分为土壤本底内源和人为活动外源。其中,土壤重金属本底由成土母岩成分决定,在不同地区、不同土质之间存在天然背景值差异;人为来源主要包括农药^[12]、肥料残留^[13]、工业活动排放以及受污染的灌溉水源等^[14]。

在全球范围内,通过对不同地区土壤与葡萄中典型重金属的含量进行检测分析,可以进一步反映出该地区的环境污染现状,对研究人员深入探究其潜在生态风险具有现实意义,也为制定有效的环境管理策略和确保葡萄品质安全提供了重要依据^[15]。在葡萄各组织中,果实作为可食用部分,其中的重金属含量是影响人类健康的关键因素。表 1 列出了世界各地典型葡萄种植区土壤与葡萄果实中的重金属含量。数据表明,在多数研究中,果实中的重金属元素含量几乎都远低于世界卫生组织/联合国粮农组织 (WHO/FAO) 规定的最大允许限量^[24]。通过计算富集系数 (表 2),可以判断出葡萄果肉对多种重金属的积累能力较弱。但结果中也会存在部分重金属含量接近限量标准值或富集系数较高的情况,其中以人体及葡萄生长所必需的微量元素 (Cu、Zn 等) 为代表,国家标准通常不会对它们进行范围限制。但无论是潜在有毒重金属还是这些必需元素,当其含量超出某一阈值时,作为生食葡萄可能会威胁人体健康;作为酿酒葡萄则会对葡萄的基因表达、代谢过程产生一定程度的负面影响,最终改变葡萄酒的品质。

张鑫荣等^[25]通过实验验证了 Cd 可以调控葡萄中相关金属元素转运蛋白基因的表达量及其活性,当胁迫浓度增加时,会出现催化酶代谢紊乱、抑制葡萄生长、改变叶片形态等现象,显著影响了葡萄果实品质。Song 等^[6]设计对照实验,得出 Zn 不仅对葡

表 1 全球各地区土壤及葡萄果实中典型重金属元素含量

Table 1 Typical heavy metal element contents of soil and grape pulp in various regions of the world.

样品 类型	重金属 元素	重金属元素在不同国家的土壤-葡萄体系中的含量 (mg/kg)							
		中国新疆 ^[16]	中国宁夏 ^[17]	中国湖南 ^[18]	美国 ^[19]	意大利 ^[20]	罗马尼亚 ^[21]	西班牙 ^[22]	塞尔维亚 ^[23]
葡萄 果实	As	—	0.0087	0.0010	0.0250	—	0.130	—	0.0022
	Cd	0.0020	0.0012	0.0290	0.0013	—	0.580	—	0.0038
	Pb	0	0.0340	0.100	0.0006	0.0510	0.310	0.185	0.0003
	Hg	—	0.00059	0.0080	—	—	0.0110	0.0158	—
	Cr	0.100	0.0560	0.330	—	0.310	0.110	2.77	0.0039
	Zn	1.26	4.70	—	4.90	1.90	1.11	3.06	1.12
	Cu	0.330	1.30	—	3.00	2.30	2.85	5.51	8.80
土壤	As	—	11.5	4.81	9.00	—	1.81	—	0.370
	Cd	0.270	0.0821	0.0650	0.130	—	14.29	0.0761	0.227
	Pb	0.100	14.5	18.9	37.0	25.9	8.49	8.68	10.8
	Hg	—	0.0300	0.0290	—	—	0.0550	0.0299	—
	Cr	47.3	48.1	39.9	—	80.1	1.21	5.10	94.0
	Zn	66.7	52.1	—	31.0	55.0	59.9	23.1	71.5
	Cu	41.2	19.9	—	11.0	21.9	40.5	72.7	38.1

注：“—”表示暂无数据。

表 2 重金属元素在土壤-果实之间的富集系数

Table 2 Enrichment coefficients of heavy metal elements between soil and grape pulp.

重金属元素	重金属元素在不同国家的土壤-葡萄体系中的富集系数 (%)							
	中国新疆	中国宁夏	中国湖南	美国	意大利	罗马尼亚	西班牙	塞尔维亚
As	—	0.08	0.02	0.28	—	7.18	—	0.59
Cd	0.74	1.46	1.20	1.00	—	4.05	—	1.67
Pb	0.00	0.23	0.53	0.00	0.20	3.65	2.13	0.00
Hg	—	1.97	0.40	—	—	20.0	52.84	—
Cr	0.21	0.12	0.83	—	0.39	9.10	54.31	0.00
Zn	1.89	9.02	—	15.81	3.45	1.85	13.25	1.57
Cu	0.80	6.53	—	27.27	10.50	7.04	7.58	23.10

注：“—”表示暂无数据。

萄果实中酚类物质组分的形成、叶片的光合作用具有促进效应,还可以提高成熟期葡萄果皮的花色苷含量。黄雨珊等^[26]研究发现 Cu、Zn、Sn 等元素会对葡萄酒的澄清度产生影响,过量时会导致酒体浑浊,析出沉淀;还会使葡萄酒的色泽、香味以及稳定性等重要特征出现不同程度的变化,在低浓度时可以起到改善颜色质量、增加颜色强度等作用,高浓度时则会出现褐变,使其颜色稳定性下降。

因此,为了确保葡萄果实及葡萄酒的品质安全,深入探究土壤-葡萄体系中与重金属含量相关的影响因素,及其在各组织之间的迁移、积累机制是具有重要意义的。

1.2 重金属含量影响因素

土壤-葡萄体系中重金属元素的迁移与积累过程及其含量,可能会受到土壤本身理化性质和组成成分^[27]、环境条件^[28]、地质特征^[28]、气候

因素^[29]、人为因素^[29]等影响。因此,在分析过程中,常需要综合多种因素进行考虑。

1.2.1 土壤的理化性质

葡萄园土壤中重金属的吸附与解吸、迁移与转化都与土壤 pH 值的变化密切相关。以往的研究结果表明,土壤 pH 值可以通过改变吸附位点、化学形态、稳定性、配位性能等^[30],直接影响重金属在土壤中的有效含量。例如,当 pH 值偏低时,一些存在于土壤固相盐类中的重金属离子会因溶解而大量被释放,离子浓度相应地会表现为较高水平^[31];随着土壤 pH 值的升高,各种重金属在土壤固相上的吸收能力也会增强,发生络合反应及产生沉淀的可能性增大,这时重金属的生物可利用度也就呈下降趋势^[32]。具体结论需综合多种驱动机制进行分析,如图 1 所示。在一定范围内,通常认为 pH 值与重金属的生物可利用度呈负相关关系。

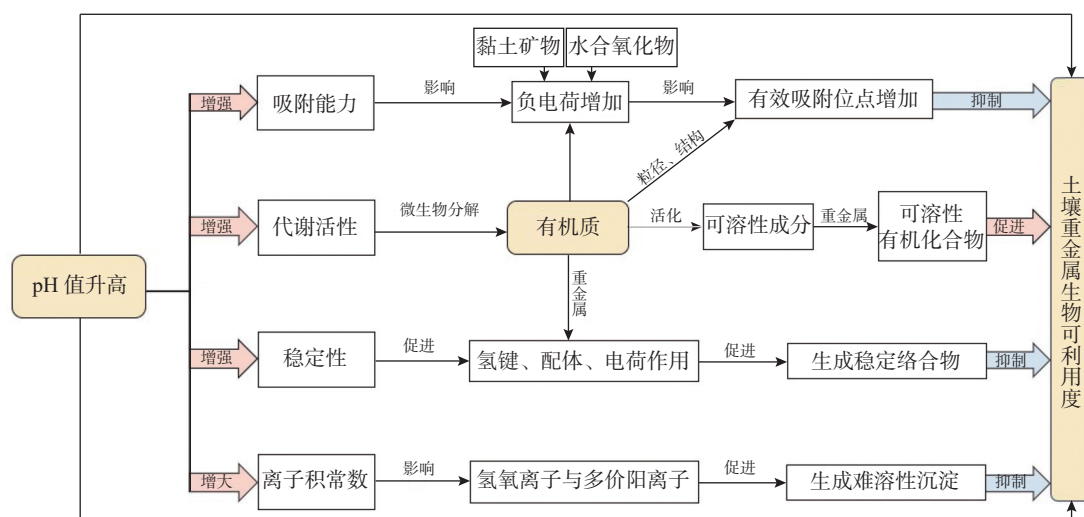


图1 pH 值与有机质对葡萄园土壤重金属生物可利用度的协同作用机制 (修改自 Wang 等^[33])

Fig. 1 The synergistic mechanism of pH and organic matter on the bioavailability of heavy metals in vineyard soil (Modified from Wang, et al^[33]).

Yang 等^[8]测定了葡萄园土壤的 pH 值与重金属 (Cd、Cu、Zn、Ni) 的生物有效含量, 结果表明研究区土壤呈微碱性 (pH=7.95); 与以往研究结果 (pH≈6) 进行对比, 生物可利用重金属占土壤重金属总量的平均比例有所下降; 结合相关性分析得到, 土壤 pH 值与重金属生物可利用含量呈显著负相关, 再次证明了 pH 值升高在一定程度上会降低土壤中重金属元素的流动性和生物可利用度。徐伟等^[34]调查分析表明, 在不同研究区域中 (南部 pH=5.73, 北部 pH=6.35), 北部葡萄园土壤中重金属 (Cr、Cd、As、Pb) 有效含量显著低于南部。

通过收集分析国内外葡萄园土壤 pH 值数据得知 (表 3), 在调查的多数葡萄园中, 土壤 pH 均值在 4.5 ~ 6.5 之间, 呈酸性或微酸性, 土壤酸化现象较明显^[34]。而研究表明, 适宜葡萄生长的 pH 值范围为 6.0 ~ 7.5^[33]。因此, 为了提升葡萄品质与产量, 以及在对葡萄园土壤进行重金属污染评估或治理时, 需要重点关注对土壤 pH 值的测定与控制。高 pH 值虽然会限制重金属元素的流动性, 使潜在有毒重金属更易吸附存在于土壤中, 降低了其向葡萄各组织迁移以及进入食物链的可能性, 但与此同时也会影响葡萄对一些必需营养元素的吸收作用。因此, 通过科学地控制与调整, 得出一个合理的 pH 值范围在该研究中显得尤为重要。

土壤有机质 (SOM) 不仅与葡萄园中土壤养分、肥力与微生物活性相关, 还会与重金属离子相互结合、发生反应, 生成具有不同化学性质的稳定性物质^[31],

表 3 不同区域的葡萄园土壤 pH 值范围

Table 3 Range of soil pH in vineyards of different regions.

研究区域	土壤 pH 值范围	文献来源
中国湖南	3.45 ~ 6.50	[34]
中国广东	3.42 ~ 6.72	[35]
中国福建	3.73 ~ 4.60	[36]
中国河北	4.80 ~ 6.80	[37]
中国辽宁	4.60 ~ 7.00	[38]
美国	5.04 ~ 6.37	[19]

从而改变各种形态下元素的存在与比例, 最终直接影响葡萄园的生产稳定性和果实品质。van Poucke 等^[39]研究表明, 重金属在土壤-葡萄体系中的生物可利用度与有机质含量呈显著正相关, 并且认为这是由于重金属可以与土壤有机质结合形成可溶性金属有机化合物, 间接地提高了重金属的溶解度和生物可利用度。Yang 等^[8]通过相关性分析也得到了相同结论, 指出葡萄园土壤的有机质含量与体系中生物可利用 Cd、Zn 和 Ni 呈显著正相关, 土壤 pH 值则与有机质含量呈极显著负相关, 这说明了二者之间存在着必然的联系。Tu 等^[40]对于该结论的解释为土壤 pH 值的增加会削弱重金属对土壤微生物的毒性作用, 增强了它们的代谢活性, 而活化微生物可以加速对土壤有机质的分解。因此, 有机质对体系中重金属含量的影响会因土壤的组分与性质的不同而产生差异, 通常不是单一的线性关系, 需结合实际判断吸附作用与活化能力的强弱, 具体机制如图 1 所示。

由于目前有关重金属含量与生物可利用度影响因素的内容在土壤相关研究中已经相对成熟,从不同角度形成了较完整的理论性结论,在土壤-葡萄体系中多数检测分析得出的结果也表现出与其他体系的一致性,因此 pH 值与有机质含量通常被认为是可适用于土壤-葡萄体系研究工作的影响因素,且多数情况已不再对其具体的作用机制展开论述。但对于在特定环境中的研究,以及出现异常结论时仍需结合实际进行分析讨论。

1.2.2 气候与地质因素

土壤-葡萄体系中,重金属元素的迁移可能受到温度、湿度、降水等气象因子的影响。Hao 等^[41]研究表明,重金属元素在体系中的生物富集系数与平均相对湿度呈显著负相关,与温度呈负相关。此外,生物富集系数还与纬度呈正相关^[41],与海拔呈显著负相关^[42]。这些相关性分析反映了重金属从土壤向葡萄各组织的转移过程中,气候与地理因素在一定程度上起到关键作用。

除此之外,土壤类型也是影响土壤中重金属元素含量与形态分布的重要因素。土壤类型包括壤土、砂土、黏土等,质地不同会直接反映为土壤的孔隙大小,从而影响土壤的紧实度和通透性^[43]。如黏土是一种含砂粒很少、颗粒细、具有黏性的土壤。它的特点为比表面积大、吸附能力强、结构疏松,其中代表组分为黏粒矿物(包括硅酸盐矿物和氧化物类)与腐殖质^[32],其作用机制如图2所示。多数研究表明在黏土中重金属元素的含量虽为较高水平,但其生物可利用度普遍较低^[44]。

Han 等^[45]分别检测了葡萄种植区域中三种土

壤类型(黏土、黏壤土、砂壤土)的理化特性和部分重金属元素含量,其中阳离子交换容量(CEC)表现为:黏土 $\approx$ 黏壤土 $>$ 砂壤土;电导率(EC)表现为:黏土 $>$ 黏壤土 $>$ 砂壤土。土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn 等元素含量表现为:黏土 $\approx$ 黏壤土 $>$ 砂壤土,而在这三种土质中种植的葡萄,其茎叶部分中4种元素含量基本表现为:砂壤土 $>$ 黏壤土 $>$ 黏土。该结果也同样说明了在黏土中,重金属元素的生物可利用度为较低水平。结合相关研究可以得知,不同土壤类型会因其中 CEC、EC 等指标之间的差异,从吸附能力、pH 值稳定性、盐分含量等方面对体系中重金属的含量产生影响。但目前在该体系研究工作中,多数情况下土壤类型并未被归类于主要影响因素。因此,是否需要重点关注该因子仍需进一步探究。

2 土壤-葡萄体系中重金属的迁移富集机制

前人研究结果表明,葡萄叶片中重金属的平均含量高于葡萄其他组织(根部、茎部、果实、皮、籽)。整体而言,在迁移特征的影响下,重金属元素的富集情况多表现为:叶片 $\approx$ 根部 $>$ 茎部 $>$ 果实。

2.1 重金属元素的迁移特征

对于葡萄各组织中重金属元素的迁移情况,不同部位、不同元素之间差异较大。Yuliya 等^[46]通过比较葡萄园土壤及葡萄植株各组织中的重金属元素(Cu、Zn、Pb)的浓度水平,得出各元素从土壤到叶片的迁移率远高于其葡萄果实的迁移率,其中 Zn 从土壤到叶片的迁移率高达从土壤到果实的32倍,以及这三种重金属迁移能力排序为:Zn $\gg$ Cu $>$ Pb。Khaska 等^[47]基于同位素分析方法,利用 Sr 同位素

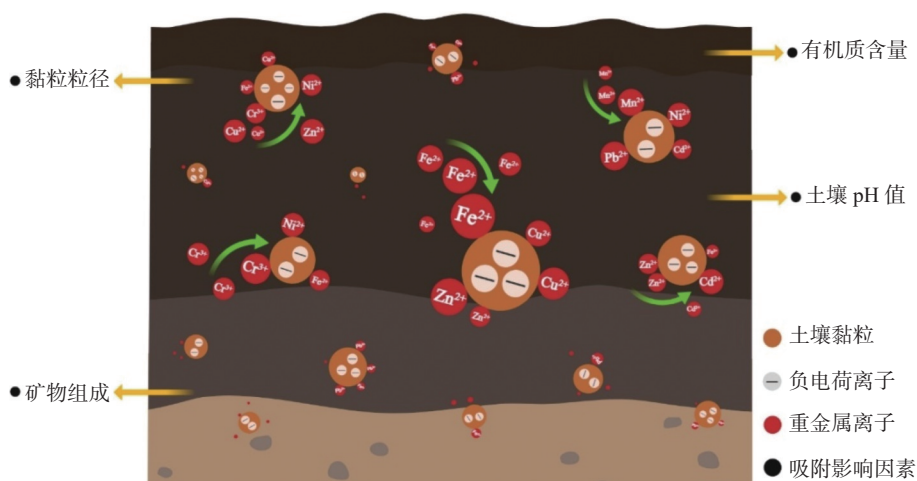


图2 黏土中重金属元素的吸附作用机制

Fig. 2 Adsorption mechanism of heavy metal elements in clay minerals.

比值作为重金属元素的替代指标也得出了相似的结论,数据表明 As、Zn、Sb、Cd 从土壤到叶片的迁移率比到葡萄果实高 10 倍。庞荣丽等^[48]通过检测并计算土壤-葡萄体系中几种重金属的迁移系数,发现大部分重金属 (Zn、Cd、Cu、Hg) 在土-根、根-茎、茎-叶界面上的传输是比较通畅的,而茎-果界面普遍对于重金属的吸收会产生一定阻碍作用;Cr、Pb、As、Ni 则表现出在茎-叶界面上有一定的迁移能力,但在其他界面迁移时均会受到不同程度的阻碍。

研究还表明,大部分重金属在向葡萄植株地下部分迁移的能力会表现为高于地上部分^[49-50],有学者对其他作物的分析认为这是由于在根部细胞壁中存在大量交换位点,可以在迁移过程中将重金属元素固定在这些位点上,从而阻止其进一步向地上部分转移^[51]。而 Bora 等^[52]在葡萄体系的研究中提出了不同的观点,他们对重金属的迁移与富集情况进行讨论分析后,发现在其组织中,尤其是根部,对于多种重金属元素具有耐受性。由此推测出在研究区域内种植的葡萄可能已经发展出某种特殊的细胞机制,该机制可以有效地在特定部位对于重金属的胁迫作用产生响应、建立耐受,并且限制根部从土壤中吸收和保留重金属元素。Mirzaei 等^[53]通过测定 4 种胁迫水平下 5 种重金属 (Zn、Cu、Cd、Cr、Pb) 浓度得到了相似的结果,其迁移系数均表现为葡萄地上组织高于根部,因此可以认为是重金属的胁迫作用改变了根部细胞原有的反应机制,出现将大量的重金属转移至葡萄地上组织中的现象。

对于葡萄的可食用部分——果实,多数研究结果显示,重金属最终保留在果实部分的含量较低。Guo 等^[18]对于该现象提出解释为,一些非必需元素进入葡萄植株体内后会主要滞留在根部细胞壁中,少量积累在液泡中,这样已限制了大部分重金属的迁移行为,剩余少量重金属在蒸腾作用下,随着水分向其他部位运输时,进一步被茎部纤维素吸附,因此最终能够到达果实部位的重金属含量极少。Mirzaei 等^[54]的研究结果表明,果肉中的重金属元素平均含量基本都在国家标准规定的范围内,这也说明了重金属向果实部分的迁移能力相对较弱。杨玉等^[55]分别采集了中国 12 个观光采摘园中的葡萄样本,发现即使生长在土壤重度污染果园中的葡萄果实,其重金属含量仍在国家食品安全标准范围之内。以及葡萄的皮和籽不是葡萄的可食用部分,且在多数检测结果中其生物量极少,因此可以不考虑

它们的积累水平对人类产生的潜在危害。

2.2 重金属元素的富集机制

多数研究成果表明,葡萄植株对于不同重金属元素的富集能力存在显著差异。庞荣丽等^[48]通过设计对照实验,得出在葡萄各组织中重金属含量分布特征多为在叶片及根部表现为较高程度的积累,茎部及果实表现为较低水平。其中 Zn 在叶片和根部中的积累量分别达到了 93mg/kg 和 51mg/kg,是果实部分(0.53mg/kg)的 175 倍和 96 倍。以及葡萄植株对于不同重金属的富集能力存在显著差异,其中典型重金属的富集系数均值大小排序为: Cd>Zn>Cu>Hg>Ni>Cr>As>Pb,根据实验数据进行分类讨论,可将上述重金属的富集能力大致划分为三类:富集能力较强 (Cd);富集能力中等 (Zn、Cu);富集能力较弱 (Cr、Pb、Ni、Hg、As)。

Milićević 等^[56]在研究中得出了相似的结论,其认为由于大气沉降(叶面喷施农药、靠近葡萄园区域的人为活动、工业活动)作用,叶片不仅会从土壤中获得重金属,还会吸收和积累空气中沉积物颗粒里的重金属,由于叶片与其他组织相比具有粗糙的结构和较大的表面积,使沉积的颗粒更易固定在其表面,这可能是导致葡萄叶片中的重金属含量高于其他组织的主要原因之一。

除此之外,重金属在不同组织中的富集也会因葡萄品种的不同而产生特定机制。邵小杰等^[57]研究结果表明不同品种 Cd 含量在根部最大可相差 3.5 倍,茎部最大相差 5.5 倍,叶片最大相差 4.5 倍。并且在不同品种之间,重金属的富集能力会因其自身物理、化学性质的影响存在显著的基因型差异,品种之间最大可相差 7 倍。对于品种之间的富集能力差异,Yuliya 等^[27]提出的解释为不同品种从土壤中特异性选择某些元素并将其转运到地上植物部分的自然能力是不同的,这与该元素是否参与其代谢过程有关。Chopin 等^[58]通过对比不同元素在葡萄组织中的积累量,得出了相似的结论,也有了新的发现,具体解释可归纳为以下三点:①必需营养元素(如: Cu、Zn)与非必需元素(如: Pb、Cd)之间的内在差异;②某些葡萄品种自身会存在满足营养需求和预防毒性的特定吸收/避免机制;③微量元素分配的差异会导致富集系数和生物可利用度的差异。

通过相关性分析得知,不同重金属的富集能力还与葡萄的生长季节呈显著相关。Milićević 等^[56]评估了重金属自结叶期(4—6月)到收获期(7—8月)

从土壤迁移至叶片的生物积累量,总结了各个时期在叶片中占优势地位的重金属元素及其原因,如图3所示。不仅如此,葡萄根系的深度、密度和树龄也在重金属的富集过程中存在着复杂的影响机制。

结合目前研究进展,土壤-葡萄体系中重金属的迁移与富集总体情况如图4所示,在分析研究结果时应结合实际环境条件进行讨论,因此得到规律性结论还需要大量实验案例及数据的佐证。

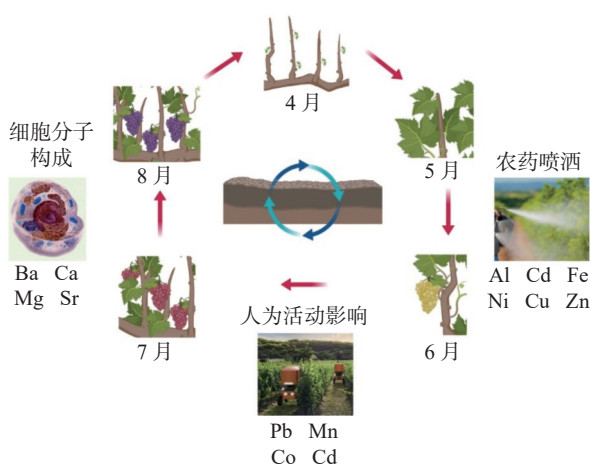


图3 不同时期重金属元素富集情况(修改自 Milićević等^[56])
Fig. 3 Enrichment of heavy metal elements in different periods (Modified from Milićević, et al^[56]).

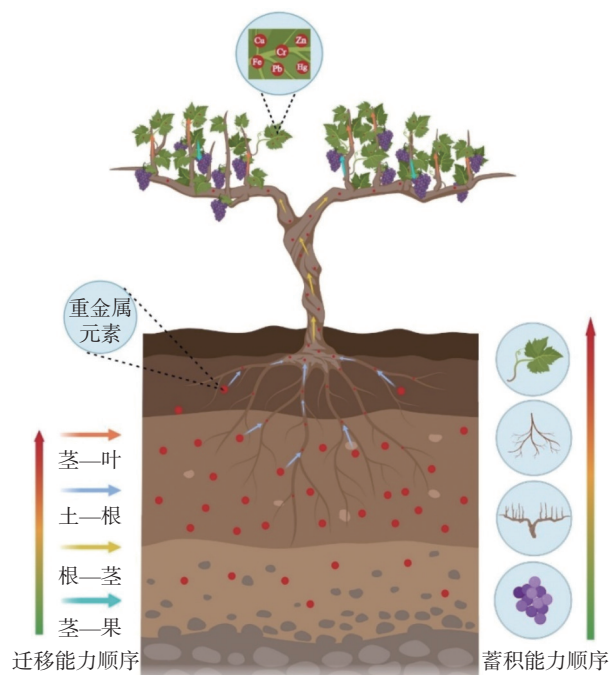


图4 土壤-葡萄体系中重金属元素的迁移与富集

Fig. 4 Migration and enrichment of heavy metal elements in the soil-grape system.

3 土壤-葡萄体系中重金属污染风险评估方法

葡萄作为多年生植物,因其根系深度广泛、生长周期较长以及特殊的抗逆生理机制,使得重金属在体系中的累积常与多种一年生作物(如玉米、水稻、小麦)存在显著差异,累积效应更为明显。并且与其他作物相比,葡萄主要用于生食和酿酒,重金属超标不仅会在多方面影响其口感与品质^[16],其潜在风险还会对人类构成直接威胁。因此,对土壤-葡萄体系开展重金属污染风险评估是至关重要的,研究人员不仅可以系统地识别和分析体系中重金属的污染状况,还能准确地定位区域污染源,为制定有针对性的治理措施提供科学依据。对人类健康来说,通过完整的评估体系,可以精准量化葡萄可食用部分的重金属含量,有利于相关部门划定合理的食品安全标准以及危害风险等级。

3.1 重金属元素污染程度评估

近年来,前人根据研究区域的环境特征定义了一系列侧重点不同的评价方法,如单因子污染指数法(P_i)、综合污染指数法(P_N)分别用来评估葡萄园土壤中单一金属元素的污染状况以及整体污染状况,数值越大,污染情况越严重^[59-60]。若需要评价多种重金属同时作用于环境时的污染状况,可采用污染负荷指数法(PLI)^[61],以及应用潜在生态风险指数(RI)^[62]可以将重金属污染对生态系统产生的潜在危害进行量化。在对研究区域进行污染评估过程中,不仅需要关注人为污染因素,对于具有不同种类岩性的地区,还需要考虑土壤中的重金属含量有可能因成土母质和土壤性质的不同而发生较大的变化^[63]。因此,地累积指数法(I_{geo})可以根据自然地质过程对重金属分布以及地球化学背景值变动产生的影响,引入相应的修正系数来反映污染状况^[64]。以上指数所对应的污染程度分级标准见表4。

3.2 重金属元素迁移能力评估

葡萄各组织对不同重金属元素的吸收能力差异较大,因此为了量化土壤到葡萄各组织的迁移情况,我们可以通过计算相关系数来辅助分析。如转运系数(TF)可表示葡萄组织中重金属含量的比值(果/茎、果/根、茎/根等),用于评估重金属按照自然顺序在不同部位之间的迁移与富集能力^[65]。生物富集系数(BCF)可表示葡萄组织中的金属元素含量与土壤中相应元素的含量之比,能在一定程度上反映出土壤-葡萄体系中元素迁移的难易程度, BCF 值越高,重金

表 4 土壤重金属污染程度分级标准 (据 Wang 等^[60] 修改)

Table 4 Classification standards for heavy metals pollution level in soil (Modified from Wang, et al^[60]).

单因子污染指数 P_i		综合污染指数 P_N		污染负荷指数 PLI		地质累积指数 I_{geo}		潜在生态风险指数 RI	
范围	程度	范围	程度	范围	程度	范围	程度	范围	程度
$P_i \leq 1$	正常	$P_N \leq 0.7$	正常	$PLI = 0$	正常	$I_{geo} \leq 0$	正常	$E_f^i < 40$	低风险
$1 < P_i \leq 2$	较正常	$0.7 < P_N \leq 1$	较正常	$0 < PLI \leq 1$	较正常	$0 < I_{geo} \leq 2$	轻度	$40 \leq E_f^i < 80$	中风险
$2 < P_i \leq 3$	轻度	$1 < P_N \leq 2$	轻度	$1 < PLI \leq 2$	轻度	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度	$80 \leq E_f^i < 160$	较高
$3 < P_i \leq 5$	中度	$2 < P_N \leq 3$	中度	$2 < PLI \leq 3$	中度	$3 < I_{geo} \leq 5$	重度	$160 \leq E_f^i < 320$	高风险
$P_i > 5$	重度	$P_N > 3$	重度	$3 < PLI \leq 4$	重度	$I_{geo} > 5$	极重度	$E_f^i \geq 320$	极高

注: 单因素污染指数法与潜在生态风险指数法中 i 表示不同的重金属元素。

属的流动性 (可用性) 越强, 同样说明了重金属在葡萄组织内的吸收、富集情况^[66]。

Bora 等^[52] 通过计算果实与葡萄茎部之间的转运系数, 得出对于大多数元素来说其转运系数 (果/茎) 均低于 1, 表明了葡萄茎部可能具有阻断重金属在葡萄中积累的特定机制。这与之前提到的 Pang 等的研究结果相一致。在该研究中, 重金属元素的生物富集系数基本低于 1, 这表明葡萄各组织对重金属的积累能力较低, 进一步证明葡萄并不是重金属的超富集物种。

以上是常用的两种评估方法。除此之外, Milićević 等^[67] 还采用生物利用度风险评估指数法 (BRAI) 计算了葡萄叶片中各元素的生物积累量, 该方法可以对土壤-葡萄体系中重金属元素的生物利用度风险进行解析与量化。

3.3 重金属元素健康风险评估

土壤中存在重金属污染不仅会对植物的生长、品质产生显著的负面影响, 并且重金属会通过食物链进行迁移和富集, 最终可能会进入人体, 严重影响人类健康^[62, 68]。目前有关健康风险的评估体系较为健全, 主要包括致癌风险模型与非致癌风险模型^[69]。用致癌风险系数 (CR) 评估人体因暴露或摄入致癌或潜在致癌物质而患癌症的概率, CR 值低于 10^{-4} 表示为可接受的风险水平^[70]。用目标危险系数 (THQ) 评估通过葡萄摄入的单一金属元素对人体造成的潜在健康风险 (非致癌风险), 若 THQ 值低于 1 则表示重金属产生的非致癌健康风险可以忽略^[71]。用危害指数 (HI) 来评价多种因素以及不同环境条件对人类健康的影响, 若 HI 指数高于 1, 则被认为对人体有不利影响^[72]。

多数研究表明, 在推荐膳食摄取量 (RDA) 范围内, 由于摄入重金属而导致的致癌与非致癌风险可

以忽略不计^[70, 73]。但 Yang 等^[8] 的研究表明, 在污水灌溉区内采集的葡萄样本的 CR 值高于美国环境保护署 (EPA) 建议的可接受范围, 这与以往的大多数报道不一致, 表明了食用在污水灌溉区种植的葡萄可能对消费者存在潜在的健康风险。因此, 有关健康风险的讨论需要结合实际研究区域的环境特征进行, 而针对由重金属积累带来的污染问题制定相关的修复、治理策略也是值得重视的。

以上各部分提出的风险评估指数计算公式见表 5。

3.4 重金属元素生态风险评估

Alagić 等^[73] 采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 来判断不同研究区域采集的样本 (土壤、葡萄组织) 之间的差异性。得到结论为: 在大多数情况下, 葡萄组织中的重金属浓度会根据采集位点的不同而发生显著变化 ($p < 0.05$), 而土壤样本则表现为没有统计学上的显著差异。Hao 等^[41] 也采用该方法来评估土壤、葡萄样本中重金属浓度及其转运系数、富集系数之间的差异是否与采集来源有关, 并得出了一致的结论。导致这种差异的因素通常比较复杂, 主要与多种环境变量有关, 因此需要结合其他方法得到更准确的结论。故作者采用 Pearson 相关性分析进一步探究了温度、降水、平均相对湿度、海拔、纬度等因子与各元素及其生物富集系数之间的关系, 结果显示多项环境因素与其是显著相关的。

Bora 等^[52] 在研究中同样选择 Pearson 相关性分析, 证明了葡萄组织中的重金属含量随着与主要污染源距离的减少而增加, 以及结合聚类分析法可判断其是否同源, 对土壤和葡萄组织样本中的重金属元素构建聚类结构, 将结果中具有相似性的元素进行分类, 证明了土壤-葡萄体系中重金属的来源具有差异性, 具体可区分为土壤性质或大气污染, 该方

表 5 风险评估指数计算公式

Table 5 Calculation methods of risk assessment index.

评估类别	相关指数	计算公式	参考文献
污染评估	P_i (单因子污染指数)	$P_i = \frac{C_i}{C_0}$	[59-60]
	P_N (综合污染指数)	$P_N = \sqrt{\frac{(P_{i\max})^2 + (P_{i\text{ave}})^2}{2}}$	
	PLI (污染负荷指数)	$PLI = \sqrt[n]{P_1 \times P_2 \times P_3 \times \cdots \times P_n}$	[61]
	I_{geo} (地质累积指数)	$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/1.5B_i)$	[62]
	(潜在生态风险指数)	$RI = \sum_{i=1}^n E_i^j$	[64]
迁移评估	TF (转运系数)	$TF = C_{i\text{地上部}}/C_{i\text{根部}}$	[65]
	BCF (生物富集系数)	$BCF = C_{\text{葡萄}}/C_{\text{土壤}}$	[66]
	$BRAI$ (生物利用度风险评估指数)	$BRAI = \frac{\sum_{i=1}^n BD_i}{\sum_{i=1}^n TE_i}$	[67]
健康评估	THQ (目标危险系数)	$THQ = \frac{C_i \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD}$	[70]
	HI (危害指数)	$HI = \sum_{i=1}^n THQ_i$	
	CR (致癌风险指数)	$CR = EDI \times SF$	[71]

法对于确定体系中重金属的污染源具有重要意义。若根据该分类结果进一步结合相关性分析,还可以推测出重金属在不同组织之间的迁移情况。

尽管上述统计学方法在数据处理中起着至关重要的作用,但应对日益全面化、多样化的研究内容与要求时,还存在一定的局限性。因此,在当前研究趋势下,可以考虑运用机器学习模型(随机森林、人工神经网络、决策树等)辅助进行数据分析,模拟重金属元素在不同环境中、葡萄不同组织中的相互作用,进一步得到重金属元素的总体特征及变化趋势,为最终预测不同区域土壤-葡萄体系的生态风险提供参考依据。

4 结论与展望

土壤-葡萄体系中的重金属元素来源较为广泛,其中外源性化学品残留和工业活动导致的大气沉降作用占据主要地位。这些重金属经以上途径进入土壤之后,通过特殊的迁移、富集机制,最终影响葡萄及葡萄制品的品质与安全。大多研究结果表明,重金属元素在土壤-葡萄体系中的迁移能力表现为在土壤-根、根-茎、茎-叶界面上较强;积累水平在叶片与根部中较高,在茎部与果实中较低。此外,有关迁移富集机制的研究结果中也常会存在一些特例,因

此具体情况需要根据研究区域的实际环境条件系统地进行分析。影响因素较为复杂,包括土壤本身理化性质和组成成分、环境条件、气候因素、地质特征、人为因素等,而 pH 值指标因与多项影响因素相关联而应被重点关注。对于土壤-葡萄体系中的风险评估,目前在污染、迁移、健康、生态等方面已形成了较为全面的评价方法,且逐渐开发应用了一系列统计学方法辅助进行相关性分析及数据处理。

研究过程中,可以发现目前的工作还存在一些局限性和研究空白:①关于葡萄不同组织中重金属元素的含量与迁移情况是否与产区地质背景、栽培模式相关也可以作为新的研究内容。未来亟需针对不同区域开展大量实地采样调查,对影响因素进行全面地分析讨论。②该研究可以促进与生物学(例如在不同浓度重金属胁迫作用下,生长的葡萄植株是否会发展出特殊的细胞机制)、化学(例如,综合地验证与对比不同提取剂对体系中重金属的提取效果)和地质学(例如,结合产地地质背景、风化特征,辅助判断体系中重金属的来源与成因)的交叉研究,特别是健康地质指标框架下的优质产地特征元素筛选和健康阈值研究;③优化机器学习模型,对未知风险及发展趋势进行预测,建立标准化、全面化、科学化的研究体系,使评估结果更具参考价值。

Research Progress on the Migration, Enrichment and Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Grape System

LU Hui¹, YU Tao^{1,2*}, ZHAO Wanfu³, WEN Qing¹, TANG Qifeng², LI Chang^{1,2}, ZHANG Liyue¹, HOU Qingye^{2,4}, YANG Zhongfang^{2,4}

(1. School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

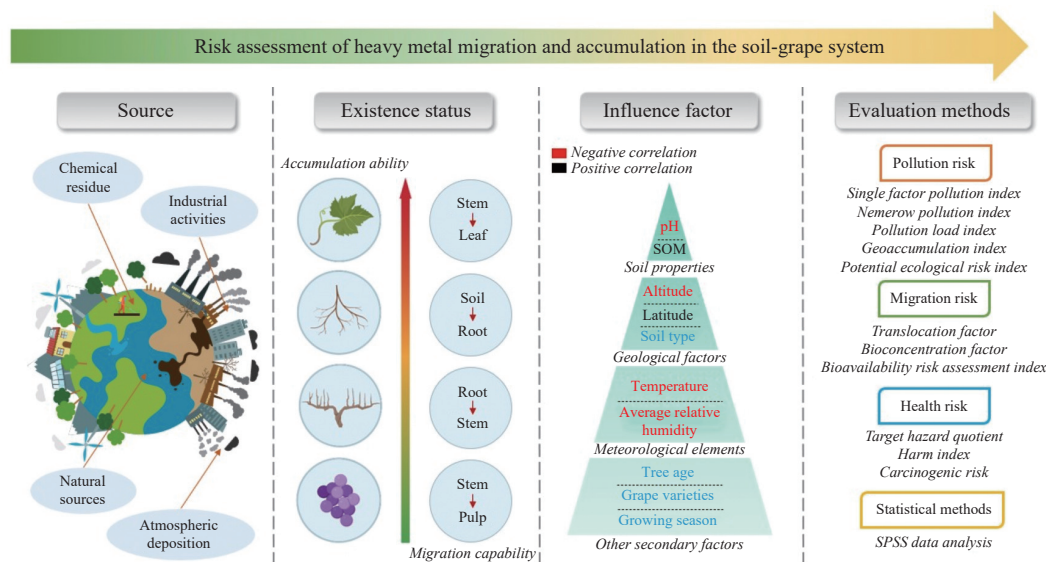
2. Key Laboratory of Ecogeochemistry, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China;

3. Land Resources Survey and Monitoring Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China;

4. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Heavy metals exhibit strong migration capabilities at the soil to root, root to stem, and stem to leaf interfaces, particularly in acidic soil. However, migration across the stem to fruit interface is relatively weak, leading to high accumulation levels in leaves and roots.
- (2) The migration and accumulation ability of heavy metals are influenced by both soil conditions and grape varieties. Different grape varieties show significant differences in their enrichment capacities and distribution patterns.
- (3) With the help of multivariate statistics, machine learning models and interdisciplinary technologies, it is the future research trend to systematically predict and evaluate the potential risks of soil-grape systems from the aspects of pollution sources and transfer enrichment characteristics.



ABSTRACT: As potentially toxic elements, the pollution level of heavy metals in vineyard soils directly affects the ecosystem balance and human health. This study analyzes the current related literature, focusing on the characteristics of heavy metal content in the soil-grape system of vineyards, their migration behavior, and the associated pollution risk assessment. The findings reveal that cadmium (Cd), copper (Cu), and zinc (Zn) significantly influence grape quality, while other heavy metals require close monitoring against national standards.

The migration rate of heavy metals from soil to grape leaves can be up to 32 times higher than to the pulp. Accumulation levels typically follow the order: leaves>roots>stems>pulp. Specifically, Zn accumulation in leaves and roots can reach as high as 93mg/kg and 51mg/kg, respectively, far exceeding the 0.53mg/kg observed in pulp. Soil pH, as a critical factor affecting heavy metal migration and accumulation, shows a negative correlation with the bioavailability of heavy metals, while organic matter content typically exhibits a positive correlation. Current findings also highlight the varietal differences in heavy metal migration; however, systematic studies on the interaction mechanisms among climatic conditions, soil types, and physiological traits remain limited. Future research should aim to comprehensively explore the factors influencing heavy metal migration and content within the system under regional environmental characteristics. The application of machine learning models is recommended to predict and evaluate interactions among heavy metals and their ecological risks under different pollution levels.

KEY WORDS: soil; grape; heavy metal elements; migration; enrichment; influence factors; risk assessment

参考文献

- [1] 李泽敏, 王振平, 赵全胜, 等. 银川酿酒葡萄产区不同种植年限土壤重金属分布特征和评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(3): 57–62.
Li Z M, Wang Z P, Zhao Q S, et al. Distribution characteristics and evaluation of soil heavy metals in different planting years in Yinchuan wine grape-producing area[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2024(3): 57–62.
- [2] Wang Y, Liu Y, Zhan W, et al. Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: Challenges and recommendations[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 139060.
- [3] Li P, Lin C, Cheng H, et al. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113: 391–399.
- [4] 路港滨, 俄胜哲, 袁金华, 等. 土壤重金属有效性影响因素及其在作物和土壤系统迁移运转规律研究进展[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(20): 67–73.
Lu G B, E S Z, Yuan J H, et al. Research progress on the influencing factors of soil heavy metal availability and their migration and operation patterns in crops and soil systems[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(20): 67–73.
- [5] 杨博, 张波, 闫培洁, 等. 甘肃省嘉峪关市酿酒葡萄园土壤重金属空间分布特征及风险评价[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(6): 777–786.
Yang B, Zhang B, Yan P J, et al. Spatial distribution characteristics and risk assessment of soil heavy metals in wine-making vineyard in Jiayuguan City, Gansu Province[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2021, 47(6): 777–786.
- [6] 宋长征. 锌元素对梅鹿辄葡萄果实与葡萄酒质量及幼苗生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Song C Z. The effect of zinc element on the quality of Merlot grape fruit and wine, as well as the growth of seedlings[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [7] 王志刚, 林海, 庞乾林. 农田重金属污染对作物的影响及其调控[J]. *中国稻米*, 2018, 24(3): 39–43.
Wang Z G, Lin H, Pang Q L. The impact and regulation of heavy metal pollution in farmland on crops[J]. *China Rice*, 2018, 24(3): 39–43.
- [8] Yang L, Ren Q, Zheng K, et al. Migration of heavy metals in the soil-grape system and potential health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150646.
- [9] Blotvogel S, Oliva P, Denaix L, et al. Stable Cu isotope ratios show changes in Cu uptake and transport mechanisms in vitis vinifera due to high Cu exposure[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 755944.
- [10] 刘旭, 金倩, 谭军. 水分胁迫和氮肥水平对葡萄吸收重金属铅的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(9): 2031–2034.
Liu X, Jin Q, Tan J. The effects of water stress and nitrogen fertilizer levels on the absorption of heavy metal lead by grapes[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(9): 2031–2034.
- [11] 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 460–476.

- Yu T, Jiang T Y, Liu X, et al. Current status of soil heavy metal pollution and research progress in detection and analysis technologies[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 460–476.
- [12] Sun X, Liu L, Zhao Y, et al. Effect of copper stress on growth characteristics and fermentation properties of *Saccharomyces cerevisiae* and the pathway of copper adsorption during wine fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2016, 192: 43–52.
- [13] Wang Y, Zheng K, Zhan W, et al. Highly effective stabilization of Cd and Cu in two different soils and improvement of soil properties by multiple-modified biochar[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 207: 111294.
- [14] Petousi I, Daskalakis G, Fountoulakis M S, et al. Effects of treated wastewater irrigation on the establishment of young grapevines[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 485–492.
- [15] Jimenez-Ballesta R, Bravo S, Amoros J A, et al. Soil and leaf mineral element contents in Mediterranean vineyards: Bioaccumulation and potential soil pollution[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2022, 233(1): 20.
- [16] 李泽涵, 李函伦, 彭昕, 等. 新疆葡萄酒产区土壤、葡萄叶、葡萄果实和葡萄酒中矿物质元素含量及其相关性分析[J]. *中国酿造*, 2022, 41(10): 30–35.
- Li Z H, Li H L, Peng X, et al. Mineral element content and correlation analysis in soil, grape leaves, grape fruits, and wine in Xinjiang wine producing areas[J]. *China Brewing*, 2022, 41(10): 30–35.
- [17] 陈翔, 开建荣, 牛艳, 等. 产地土壤重金属对贺兰山东麓酿酒葡萄的影响及风险评估[J]. *中国酿造*, 2020, 39(7): 178–181.
- Chen X, Kai J R, Niu Y, et al. Effects of heavy metals in soil on wine grape in the Helan Mountain's Eastern Region and risk assessment[J]. *China Brewing*, 2020, 39(7): 178–181.
- [18] 郭亮. 长株潭地区葡萄园重金属含量评价及镉对葡萄生理特性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- Guo L. Evaluation of heavy metal content in vineyards in Changzhutan area and the effect of cadmium on the physiological characteristics of grapes[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.
- [19] Richardson J B, Chase J K. Transfer of macronutrients, micronutrients, and toxic elements from soil to grapes to white wines in uncontaminated vineyards [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24): 13271.
- [20] Protano G, Rossi S. Relationship between soil geochemistry and grape composition in Tuscany (Italy)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(4): 500–508.
- [21] Bora F D, Bunea C I, Rusu T, et al. Vertical distribution and analysis of micro-, macroelements and heavy metals in the system soil-grapevine-wine in vineyard from North-West Romania[J]. *Chemistry Central Journal*, 2015, 9: 19.
- [22] Vázquez F A V, Cid B P, Segade S R. Assessment of metal bioavailability in the vineyard soil-grapevine system using different extraction methods[J]. *Food Chemistry*, 2016, 208: 199–208.
- [23] Miličević T, Aničić U M, Relić D, et al. Environmental pollution influence to soil-plant-air system in organic vineyard: Bioavailability, environmental, and health risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(3): 3361–3374.
- [24] Shaheen N, Irfan N M, Khan I N, et al. Presence of heavy metals in fruits and vegetables: Health risk implications in Bangladesh[J]. *Chemosphere*, 2016, 152: 431–438.
- [25] 张鑫荣, 杨洪强, 隋静, 等. 葡萄根系钙处理对叶片镉伤害的保护作用[J]. *园艺学报*, 2008, 35(10): 1405–1410.
- Zhang X R, Yang H Q, Sui J, et al. Calcium protects grape leaves against cadmium stress by root treatment[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(10): 1405–1410.
- [26] 黄雨珊, 范舒悦, 勾叙衡, 等. 金属元素在葡萄酒中的作用[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(11): 446–456.
- Huang Y S, Fan S Y, Gou X H, et al. The role of metal elements in wine[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2023, 23(11): 446–456.
- [27] Yuliya V, Reelika R, Nina K, et al. Comparison of soil-to-root transfer and translocation coefficients of trace elements in vines of Chardonnay and Muscat white grown in the same vineyard[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 192: 89–96.
- [28] Gulan L, Stajic J M, Milenkovic B, et al. Plant uptake and soil retention of radionuclides and metals in vineyard environments[J]. *Environmental Science and*

- Pollution Research*, 2021, 28(36): 49651–49662.
- [29] Castillo P, Serra I, Townley B, et al. Biogeochemistry of plant essential mineral nutrients across rock, soil, water and fruits in vineyards of Central Chile[J]. *Catena*, 2021, 196: 104905.
- [30] Zhong X, Chen Z, Li Y, et al. Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123289.
- [31] Zeng F, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84–91.
- [32] 曹勤英, 黄志宏. 污染土壤重金属形态分析及其影响因素研究进展[J]. *生态科学*, 2017, 36(6): 222–232.
- Cao Q Y, Huang Z H. Research progress on heavy metal forms analysis and influencing factors in polluted soil[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(6): 222–232.
- [33] 王逸群, 许端平, 薛杨, 等. Pb 和 Cd 赋存形态与土壤理化性质相关性研究[J]. *地球与环境*, 2018, 46(5): 451–455.
- Wang Y Q, Xu D P, Xue Y, et al. Study on the correlation between the occurrence forms of Pb and Cd and soil physicochemical properties[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(5): 451–455.
- [34] 徐伟. 湖南省不同地区葡萄园土壤理化特性和重金属污染风险研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- Xu W. Study on the physical and chemical characteristics of vineyard soil and the risk of heavy metal pollution in different regions of Hunan Province[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [35] 谢玉明, 聂松青, 聂俊, 等. 广东东莞地区阳光玫瑰葡萄园土壤养分状况分析[J]. *经济林研究*, 2021, 39(3): 197–204.
- Xie Y M, Nie S Q, Nie J, et al. Analysis of soil nutrient status in sunshine rose vineyards in Dongguan, Guangdong Province[J]. *Nonwood Forest Research*, 2021, 39(3): 197–204.
- [36] 范晓晖, 刘文婷, 谢星, 等. 寿宁县高山设施葡萄园土壤养分状况及施肥管理建议[J]. *海峡科学*, 2023(5): 64–67.
- Fan X H, Liu W T, Xie X, et al. Soil nutrient status and fertilization management suggestions for high-altitude facility vineyards in Shouning County[J]. *Staits Science*, 2023(5): 64–67.
- [37] 王茜, 朱晓宝, 姜英, 等. 秦皇岛产区葡萄园土壤养分状况调查与分析[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2022(5): 80–87.
- Wang Q, Zhu X B, Jiang Y, et al. Investigation and analysis of soil nutrient status in vineyards in Qinhuangdao production area[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2022(5): 80–87.
- [38] 包红静, 邢月华, 刘艳, 等. 辽南葡萄主产区土壤养分特征研究[J]. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1149–1155.
- Bao H J, Xing Y H, Liu Y, et al. Study on soil nutrient characteristics in the main grape production area of Southern Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5): 1149–1155.
- [39] van Poucke R, Ainsworth J, Maesele M, et al. Chemical stabilization of Cd-contaminated soil using biochar[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 88: 122–130.
- [40] Tu C, Wei J, Guan F, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil[J]. *Environment International*, 2020, 137: 105576.
- [41] Hao X, Gao F, Wu H, et al. From soil to grape and wine: Geographical variations in elemental profiles in different chinese regions[J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3108.
- [42] 张云峰, 李艳, 严斌, 等. 葡萄园土壤中4种金属元素的测定及其对葡萄和葡萄酒的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(24): 374–379.
- Zhang Y F, Li Y, Yan B, et al. Determination of four metal elements in vineyard soil and their effects on grapes and wines[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 31(24): 374–379.
- [43] 侯彪. 不同粒径团聚体中重金属的分配规律及影响因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- Hou B. Distribution patterns and influencing factors of heavy metals in aggregates of different particle sizes[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [44] Pham N T H, Babcsányi I, Balling P, et al. Accumulation patterns and health risk assessment of potentially toxic elements in the topsoil of two sloping vineyards (Tokaj-Hegyalja, Hungary)[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(10): 2671–2689.
- [45] Han X, Lu H, Wang Y, et al. Region, vintage, and grape

- maturity co-shaped the ionic signatures of the Cabernet Sauvignon wines[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112165.
- [46] Yuliya V, Liliya R, Dmytro D, et al. Trace metals in wine and vineyard environment in Southern Ukraine[J]. *Food Chemistry*, 2014, 146: 339–344.
- [47] Khaska S, Le Gal La Salle C, Sassine L, et al. Innovative isotopic method to evaluate bioaccumulation of As and MTes in *Vitis vinifera*[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 1126–1136.
- [48] 庞荣丽, 王书言, 王瑞萍, 等. 重金属在土壤-葡萄体系中的富集和迁移规律[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(4): 515–521.
- Pang R L, Wang S Y, Wang R P, et al. The enrichment and migration patterns of heavy metals in the soil grape system[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(4): 515–521.
- [49] 刘强, 呼丽萍, 鱼潮水. 土壤-樱桃系统重金属累积和樱桃食用健康风险评估[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(2): 161–169.
- Liu Q, Hu L P, Yu C S. Heavy metal accumulation in the soil cherry system and health risk assessment of cherry consumption[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018(2): 161–169.
- [50] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2007(4): 52–56.
- Li F L, Liu C Q, Yang Y G, et al. Migration characteristics of heavy metals in the vegetable garden soil chili system in the suburbs of Guiyang City[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007(4): 52–56.
- [51] 江水英, 吴声东, 肖化云, 等. 贵溪冶炼厂周边菜园地土壤—辣椒系统中重金属的迁移特征[J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(3): 628–632.
- Jiang S Y, Wu S D, Xiao H Y, et al. Migration characteristics of heavy metals in the soil pepper system of vegetable gardens around Guixi Smelter[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(3): 628–632.
- [52] Bora F D, Bunea C I, Chira R, et al. Assessment of the quality of polluted areas in Northwest Romania based on the content of elements in different organs of grapevine (*Vitis vinifera* L.)[J]. *Molecules*, 2020, 25(3): 750.
- [53] Mirzaei M, Verrelst J, Bakhtiari A R, et al. Potential use of grapevine cv Askari for heavy metal phytoremediation purposes at greenhouse scale[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(10): 12447–12458.
- [54] Mirzaei M, Marofi S, Solgi E, et al. Ecological and health risks of soil and grape heavy metals in long-term fertilized vineyards (Chaharmahal and Bakhtiari Province of Iran)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(1): 27–43.
- [55] 杨玉, 尹春峰, 汤佳乐, 等. 长沙和株洲地区葡萄园土壤重金属含量分析及污染评价[J]. *湖南农业科学*, 2017(8): 41–44.
- Yang Y, Yin C F, Tang J L, et al. Analysis and pollution evaluation of heavy metal content in vineyard soil in Changsha and Zhuzhou regions[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(8): 41–44.
- [56] Milićević T, Urošević M A, Relić D, et al. Bioavailability of potentially toxic elements in soil-grapevine (leaf, skin, pulp and seed) system and environmental and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 528–545.
- [57] 邵小杰. 葡萄根系和叶片对氯化镉处理的生理学与细胞学响应[D]. 济南: 山东农业大学, 2009.
- Shao X J. Physiological and cytological responses of grape roots and leaves to cadmium chloride treatment[D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2009.
- [58] Chopin E I B, Marin B, Mkoungafoko R, et al. Factors affecting distribution and mobility of trace elements (Cu, Pb, Zn) in a perennial grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the Champagne region of France[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3): 1092–1098.
- [59] 王棣, 李杰飞, 杨浩, 等. 洛阳市栾川县矿区周边土壤重金属污染特征、来源与生态风险评估[J]. *环境化学*, 2024, 43(10): 3363–3376.
- Wang D, Li J F, Yang H, et al. Characteristics, sources and ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in the surrounding areas of Luanchuan County, Luoyang City[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(10): 3363–3376.
- [60] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2104–2114.
- Wang H Y, Han L, Xie D N, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals

- in farmland soil around mining areas[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2104–2114.
- [61] Li C, Quan Q, Gan Y, et al. Effects of heavy metals on microbial communities in sediments and establishment of bioindicators based on microbial taxa and function for environmental monitoring and management[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141555.
- [62] 麦尔哈巴·图尔贡. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染及潜在风险评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2021. Turrhun M. Heavy metal pollution and potential risk assessment of vineyard soil in Turpan Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2021.
- [63] 张文强, 滕跃, 柳浩然, 等. 聊城市典型农业区土壤重金属分布特征、生态风险及来源解析[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(4): 171–180. Zhang W Q, Teng Y, Liu H R, et al. Distribution characteristics, ecological risks, and source analysis of soil heavy metals in typical agricultural areas of Liaocheng City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(4): 171–180.
- [64] 胡兆鑫, 吴泽燕, 罗为群, 等. 典型岩溶县土壤重金属含量、来源及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2024, 45(9): 5506–5516. Hu Z X, Wu Z Y, Luo W Q, et al. Soil heavy metal content, sources, and ecological risk assessment in typical karst counties[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5506–5516.
- [65] Zinicovscaia I, Sturza R, Gurmeza I, et al. Metal bioaccumulation in the soil–leaf–fruit system determined by neutron activation analysis[J]. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 2019, 13(1): 592–601.
- [66] Jimenez-Ballesta R, Bravo S, Amoros J A, et al. Preliminary assessment of the occurrence of six rare earth elements in calcareous vineyard soils[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, 232(2): 76.
- [67] Milićević T, Relić D, Urošević M A, et al. Integrated approach to environmental pollution investigation —Spatial and temporal patterns of potentially toxic elements and magnetic particles in vineyard through the entire grapevine season[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 163: 245–254.
- [68] Wang Q, Liu J, Cheng S. Heavy metals in apple orchard soils and fruits and their health risks in Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(1): 4178.
- [69] 麦尔哈巴·图尔贡, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染及其潜在健康风险[J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(6): 558–565. Turrhun M, Eziz M, Wang W W. Heavy metal pollution and potential health risks of vineyard soil in Turpan Basin[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2020, 37(6): 558–565.
- [70] Kukusamude C, Sricharoen P, Limchoowong N, et al. Heavy metals and probabilistic risk assessment via rice consumption in Thailand[J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 127402.
- [71] 单爱琴, 张威, 周洪英. 徐州市不同功能区重金属污染与健康风险评价[J]. *环境工程*, 2016, 34(9): 125–129. Shan A Q, Zhang W, Zhou H Y. Heavy metal pollution and health risk assessment in different functional areas of Xuzhou City[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(9): 125–129.
- [72] Rezaei M, Ghasemidehkordi B, Peykarestan B, et al. Potentially toxic element concentration in fruits collected from Markazi Province (Iran): A probabilistic health risk assessment[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2019, 32(11): 839–853.
- [73] Alagić S C, Tošić S B, Dimitrijević M D, et al. The content of the potentially toxic elements, iron and manganese, in the grapevine cv Tamjanika growing near the biggest copper mining/metallurgical complex on the Balkan Peninsula: Phytoremediation, biomonitoring, and some toxicological aspects[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(34): 34139–34154.