

205 国道两侧农田土壤和水稻叶片及糙米中重金属含量的空间分布特征

杨奕如, 殷云龙^①, 於朝广, 徐建华, 徐和宝

(江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014)

摘要: 对 205 国道无林带典型路段东西两侧 200 m 范围内的农田表层土壤、稻(*Oryza sativa* L.)叶及糙米中 Al、Cd、Cr、Cu、Fe、Ni、Pb、Zn 和 As 的含量及空间分布规律进行了分析研究。结果表明, 205 国道两侧农田表层土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量达到土壤环境质量一级标准(GB15618-1995), As 含量超过土壤环境质量三级标准。西侧表层土壤中的 Al、Cr、Fe、Ni、Zn 和 As 含量, 稻叶中的 Al、Cd、Cr、Fe 和 Ni 含量及糙米中的 Al、Cd、Cr、Cu、Fe 和 Ni 含量均比东侧高, 表明路西侧受汽车尾气扩散沉降影响比东侧明显, 并与该路段主风向为偏东风有关; 西侧表层土壤中的 Ni 和 Zn 含量及东侧表层土壤中的 Cd 含量、西侧稻叶中的 Al 和 Zn 含量、西侧糙米中的 Fe 含量和东侧糙米中的 Al 含量均有随路侧距离增加而显著递减的规律, 负相关关系显著或极显著; 稻叶和糙米中某些重金属的含量有明显的峰值区域, 均位于路侧 10~20 m 区域内, 并与土壤中的含量有显著或极显著的正相关关系; 在糙米中未检出 As, 且 Al、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量均未超出国家食品卫生标准, 但部分样本 Ni 和 Pb 含量略有超标。主成分分析结果显示, 稻叶中的 Pb 主要来源于土壤, 而稻叶中其他重金属含量明显受到公路环境污染物扩散沉降影响。研究结果显示, 重金属元素已在 205 国道两侧的农田表层土壤中显著累积, 其中 As 的积累最严重; 稻叶和糙米中重金属的含量水平明显受到公路汽车尾气扩散沉降的影响, 且扩散沉降集中在距离公路边缘 10~20 m 的区域内。

关键词: 公路两侧; 土壤; 水稻叶片; 糙米; 重金属含量; 空间分布; 相关性分析

中图分类号: X171.5; X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-0978(2009)02-0073-07

Spatial distribution characteristics of heavy metal content in soil, rice leaf and brown rice in farmland on both sides of No. 205 national road YANG Yi-ru, YIN Yun-long^①, YU Chao-guang, XU Jian-hua, XU He-bao (Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2009, **18**(2): 73-79

Abstract: Contents of Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn and As in surface soil, rice leaf and brown rice (*Oryza sativa* L.) in farmland of 200 m range away from No. 205 national road without forest belt and their spatial distribution rules were investigated. The results show that the contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in surface soil reach the first grade of Environmental Quality Standard for Soils (GB15618-1995), and the As content exceeds the limit of the third grade. The contents of Al, Cr, Fe, Ni, Zn and As in surface soil, Al, Cd, Cr, Fe and Ni in rice leaf, and Al, Cd, Cr, Cu, Fe and Ni in brown rice on the western side are higher than those on the eastern side, indicating a greater influence of dispersion and deposition of vehicle emissions on the western side, and this phenomenon relates to the easterly prevailing wind. The contents of Ni and Zn in surface soil on the western side, Cd in surface soil on the eastern side, Al and Zn in rice leaf on the western side, Fe in brown rice on the western side and Al in brown rice on the eastern side have a rule of obviously decreasing with the distance away from road edge increasing, and have significant or extremely significant negative correlation with distance away from road edge. Content distributions of some heavy metals in rice leaf and brown rice have an obvious peak value range, reach their peaks in range of 10-20 m away from the road edge, and have significant or

收稿日期: 2009-01-08

基金项目: 江苏省自然科学基金重点项目(BK2006711-2)

作者简介: 杨奕如(1984—), 女, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事植物资源与生态环境方面的研究。

^①通讯作者 E-mail: xhh3027@jlonline.com

extremely significant positive correlation with contents in surface soil. In brown rice, element As is not detected and the contents of Al, Cd, Cr, Cu and Zn don't exceed the limits of the national food sanitary standards, but the contents of Ni and Pb in some samples are slightly higher. According to principal component analysis, Pb in rice leaf mainly comes from the surface soil and the contents of the other heavy metals in rice leaf are obviously influenced by dispersion and deposition of contaminants from the road. It is suggested that heavy metals accumulate obviously in farmland on both sides of No. 205 national road, in which the accumulation of As is the most serious. Contents of heavy metals in rice leaf and brown rice are obviously influenced by dispersion and deposition of vehicle emissions which are concentrated in range of 10–20 m away from the road edge.

Key words: roadside; soil; rice leaf; brown rice; heavy metal content; spatial distribution; correlation analysis

近年来,中国城乡机动车保有量以每年10%~15%的速度增长,汽车尾气污染已成为大气污染物的主要来源之一。在石油类燃料燃烧排放出的微粒中,重金属的含量由高至低依次为: Ni (6.0%)、Al (5.0%)、Fe (2.5%)、Pb (0.18%)、Cu (0.16%)、Cr (0.12%)、Zn (0.05%) 和 As (0.02%) 等^[1]。公路环境中的 Pb 污染主要来源于汽车尾气,虽然中国已全面推行使用无铅汽油,但无铅汽油并非绝对无铅,只是汽油中铅的平均浓度由 $0.019 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至国家标准值 $0.005 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (GB17930–2006)。机械和轮胎的磨损及发动机润滑油的损耗等都会造成公路环境中 Pb、Cd、Cu 及 Zn 等多种重金属污染^[2]。

国道是国家干线公路,其两侧往往分布着大量的农业用地,公路环境中的重金属污染对公路两侧农田土壤和农产品安全性的影响已成为人们关注的重点之一。调查发现,重金属在公路两侧土壤中存在显著的累积,许多公路旁土壤的 Pb 含量均比当地的背景值高^[3];土壤 Pb 污染主要与交通量、汽油铅含量、风速风向及沉降量等有关^[2];裸露土壤中的 Pb 含量明显高于有作物种植的土壤中的 Pb 含量^[4];公路重金属污染会对农作物的产量和品质造成影响^[5]。这些研究报道多侧重于对公路边农作物食用部分和 Pb 污染影响方面,而对公路两侧不同距离内土壤和农作物中重金属含量的空间分异特征却少有研究报道。

作者以交通比较繁忙的 205 国道(日车流量为 2.6 万辆)为研究对象,选择无林带防护的典型路段,对公路两侧农田表层土壤、水稻 (*Oryza sativa* L.) 叶片和糙米中不同重金属元素的空间分布特征及受污染程度进行较为系统的研究,以期为公路绿化防护对策的拟定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 样地选择

在分析了大量背景资料和相关研究成果的基础上,结合本项目的研究目的并充分考虑到研究的可行性,选择 205 国道江苏省淮安段为实验路段。该路段位于江苏省淮安市,地处北纬 $32^{\circ}43' \sim 34^{\circ}06'$ 、东经 $118^{\circ}12' \sim 119^{\circ}36'$,南北走向。以 205 国道两侧无林带典型路段(K165 附近)且周围 1 km 以上无工业源污染物排放的成片农田为样地。

1.2 方法

1.2.1 样品的采集及预处理 土壤采样点分别位于距东、西两侧路基 5、10、20、40、60、80、100、150 和 200 m 处,共 18 个采样点;水稻和糙米采样点为距东侧路基 10、20、40 和 200 m 处及距西侧路基 5、10、20、40、60、80、100、150 和 200 m 处,共 13 个采样点。为了保证测定结果具有代表性,在每个采样点首先画出 1 条长约 80 m 并与公路平行的线段,在线段上等距离布设 4 个重复采集点,间距约 20 m。

于 2007 年 5 月中旬采集土壤样品。用塑料铲在各采集点挖掘 20 cm 深的土壤剖面,采用蛇形取样法,每个采集点取 5 处剖面土混合后作为 1 个土样(鲜质量 1 kg)^[6],共采集 72 个土壤样品。将新鲜土壤样品置于室内通风处自然风干,弃去其中的侵入物和新生体,用木质器具压碎、碾细后过 100 目尼龙筛,装入自封袋中保存、备用。

于同年 10 月中旬水稻完熟期采集稻叶和稻穗样品,采集部位为水稻顶生 1 位和 2 位的叶片和成熟的稻穗,叶片和稻穗样品各 44 个。将新鲜的稻叶和稻穗用表面活性剂(洗衣粉)快速浸泡 10 s,自来水冲洗 30 s,去离子水清洗 30 s,置于烘箱内 105°C

杀青 10 min 后, 于 80 °C 烘干 2 h; 将烘干的叶片和糙米分别用高速粉碎机粉碎后, 装入自封袋装并保存于干燥器内, 备用。

1.2.2 重金属含量的分析 参照文献[7]的方法, 将上述水稻叶片和糙米及土壤样品分别用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 和 $\text{HCl} - \text{HNO}_3$ 混合酸消解液消解并定容后, 用等离子体发射光谱仪 (ICP - ES, OPTIMA 4300DV) 分析样品中 Al、Cd、Cr、Cu、Fe、Ni、Pb、Zn 和 As 等 9 种元素的含量, 并计算糙米中重金属的超标倍数和超标频度。每批试样抽取 20% 样本进行平行双样检测, 并插入空白试剂 (仅加混合酸不加样品作为空白对照) 及标准质控样品 (美国 SPEX CertiPrep 公司混合标样) 进行监控。

1.3 数据统计分析

采用 SPSS 16.0 统计软件和 Excel 2003 软件进行相关性分析和主成分分析。超标倍数和超标频度的计算公式分别为: 超标倍数 = (实测含量/安全限量值) - 1; 超标频度 = (超标样本总数/监测样本总数) × 100%。

2 结果和分析

2.1 205 国道两侧农田表层土壤中重金属元素含量的分布特征和相关分析

205 国道两侧无林带防护农田表层土壤中 9 种重金属元素含量的空间变化如表 1 所示。由表 1 数据可看出, 205 国道西侧土壤中的 Al、Cr、Fe、Ni、Zn 和 As 含量均高于东侧, 而东侧土壤中的 Cd、Cu 和

Pb 含量则高于西侧, 表明西侧土壤受大多数重金属元素污染的影响比东侧明显, 显示西侧土壤受汽车尾气扩散沉降影响比东侧明显, 这可能与 205 国道所在地区全年偏东风占主导地位有关。

从表 1 中还可以看出, 西侧表层土壤中的 Ni 和 Zn 含量与样点距路侧的距离间有显著的负相关性 ($P < 0.05$), 相关系数分别为 -0.727 和 -0.740; 东侧土壤中的 Cd 含量与样点距路侧的距离间有极显著的负相关性 ($P < 0.01$), 相关系数为 -0.915, 显示出 205 国道两侧农田土壤中的 Ni、Zn 和 Cd 含量有随路侧距离的增加而递减的规律性, 也表明有明显的汽车尾气扩散沉降影响; 而其他重金属元素的含量未显示出这一递减规律, 这与李波等^[8]的研究结果一致, 但不同于吴永刚等^[9]对 312 国道旁土壤中重金属含量的测定结果, 可能是因为前者样地为农田而后者为山区林地, 后者的人为干扰程度小于前者。

将表 1 中各重金属元素含量与《土壤环境质量标准》(GB15618 - 1995)^[10] 进行比对, 可以看出, 205 国道两侧土壤中的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量达到土壤环境质量一级标准, 而 As 含量则超过土壤环境质量三级标准。

2.2 205 国道两侧稻叶中重金属元素含量的分布特征和相关分析

2.2.1 稻叶中重金属元素含量的分布特征 植物叶片是大气污染物的吸收和监测器官, 叶片中的重金属含量能在一定程度上反映土壤中的重金属污染状况。在 205 国道两侧农田的稻叶中未检出 As (表

表 1 205 国道东西两侧农田表层土壤中重金属元素含量的比较及其与路侧距离的相关性¹⁾

Table 1 Comparison of heavy metal content in surface soil of farmland on eastern and western sides of No. 205 national road and its correlation with the distance away from road edge¹⁾

| 元素 Element | 路东侧 Eastern side of road | | 路西侧 Western side of road | |
|---------------|---|-----------|--|----------|
| | 含量 Content | R_d | 含量 Content | R_d |
| Al | (2.55 ± 0.30)% | 0.360 | (4.60 ± 0.19)% | 0.617 |
| Cd | 0.18 ± 0.09 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.915 ** | 0.01 ± 0.01 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.388 |
| Cr | 25.70 ± 2.11 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.212 | 40.89 ± 1.19 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.250 |
| Cu | 29.40 ± 3.16 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.037 | 27.06 ± 1.53 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.260 |
| Fe | (1.89 ± 0.17)% | 0.402 | (3.04 ± 0.11)% | 0.435 |
| Ni | 14.36 ± 1.45 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.046 | 24.54 ± 1.30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.727 * |
| Pb | 14.93 ± 0.89 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.069 | 14.21 ± 2.89 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.599 |
| Zn | 38.79 ± 16.37 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.190 | 57.02 ± 8.12 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.740 * |
| As | 35.08 ± 3.43 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.588 | 57.99 ± 4.30 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | -0.586 |

¹⁾ 重金属含量为 36 个样本 (9 个样品采集点 4 次重复样品) 的平均值 The heavy metal content is the average of thirty-six samples (four replication samples in nine plots); R_d : 重金属含量与距路侧距离的相关系数 Correlation coefficient between heavy metal content and the distance away from road edge. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2),但西侧稻叶中 Al、Cd、Cr、Fe 和 Ni 含量均比东侧高,而东侧稻叶中的 Cu、Pb 和 Zn 含量则比西侧高,表明 205 国道西侧受公路环境污染物沉降影响比东侧明显,这也可能与主导风向密切相关。

从表 2 中还可以看出,在距 205 国道两侧路缘不同距离的区域内,稻叶中的重金属元素含量大多有明显的峰值区域。东侧稻叶中 Al、Cd、Cu、Fe 和 Zn 含量的峰值大多出现在距路侧 10 m 左右的区域内,而 Cr、Ni 和 Pb 含量却没有明显的峰值区域;西侧稻叶中 Al、Cr、Fe、Ni 和 Zn 含量峰值出现在距路侧 20 m 左右的区域内,而 Cd、Cu 和 Pb 含量则没有明显的峰值区域。研究结果表明,205 国道东西两侧重金属颗粒扩散沉降影响的距离是距路侧 10 ~ 20 m 区域附近,且西侧尾气扩散沉降的距离比东侧远,这也表明与偏东的主导风向有关。

相关性分析结果表明(表 2),205 国道东侧稻叶中的 Al、Fe、Zn 含量以及西侧稻叶中的 Al、Ni、Zn 含量与距路侧的距离有明显的负相关性,其中西侧稻

叶中的 Al 和 Zn 的负相关性达到显著水平($P < 0.05$),表明稻叶中这些重金属元素的含量具有随路侧距离增加而递减的规律,即稻叶中的重金属含量水平与路侧附近环境污染物的扩散沉降量密切相关。

植物可以从土壤中吸收重金属,而且植物体内重金属含量与土壤中的重金属浓度有一定的关系,在土壤中含量高的元素在作物中的含量也高^[11],但土壤中的重金属浓度并不是植物吸收程度的一个可靠指标^[12]。相关性分析结果表明,205 国道东侧稻叶中的 Fe 含量与土壤中的 Fe 含量显著正相关($P < 0.05$),相关系数为 0.953;西侧稻叶中的 Zn 含量与土壤中的 Zn 含量显著正相关($P < 0.05$),相关系数为 0.800;两侧稻叶中大部分重金属元素含量与土壤中的重金属含量没有明显相关性,表明稻叶中大多数重金属元素的积累除来源于土壤外,还受到来自汽车尾气扩散沉降的影响。

表 2 205 国道东西两侧水稻叶片中重金属元素含量的比较及相关性分析¹⁾

Table 2 Comparison of heavy metal content in rice (*Oryza sativa* L.) leaf from eastern and western sides of No. 205 national road and correlation analysis¹⁾

| 元素 Element | 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Content | 样本数 Sample number | 峰值区域 Peak value range | R_d | R_c |
|--------------------------|--|----------------------|--|----------|---------|
| 路东侧 Eastern side of road | | | | | |
| Al | 48.64 ± 10.64 | 4 × 4 | 路侧 10 m 10 m away from road edge | -0.890 | 0.417 |
| Cd | 0.16 ± 0.02 | 4 × 4 | 路侧 10 m 10 m away from road edge | -0.419 | 0.548 |
| Cr | 6.58 ± 1.17 | 4 × 4 | 不明显 Un-obvious | 0.512 | -0.374 |
| Cu | 6.56 ± 0.43 | 4 × 4 | 路侧 10 m 10 m away from road edge | -0.431 | 0.040 |
| Fe | 151.82 ± 19.88 | 4 × 4 | 路侧 10 m 10 m away from road edge | -0.755 | 0.953 * |
| Ni | 2.01 ± 0.45 | 4 × 4 | 不明显 Un-obvious | 0.227 | -0.770 |
| Pb | 3.54 ± 0.23 | 4 × 4 | 不明显 Un-obvious | -0.208 | -0.069 |
| Zn | 40.76 ± 11.46 | 4 × 4 | 路侧 10 ~ 40 m 10 - 40 m away from road edge | -0.864 | 0.388 |
| As | - | 4 × 4 | - | - | - |
| 路西侧 Western side of road | | | | | |
| Al | 63.85 ± 14.89 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | -0.778 * | -0.497 |
| Cd | 0.17 ± 0.05 | 7 × 4 | 不明显 Un-obvious | 0.485 | - |
| Cr | 7.69 ± 1.83 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | -0.536 | -0.005 |
| Cu | 5.09 ± 1.25 | 7 × 4 | 不明显 Un-obvious | 0.157 | -0.602 |
| Fe | 173.39 ± 19.13 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | -0.567 | -0.046 |
| Ni | 5.98 ± 0.43 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | -0.643 | 0.498 |
| Pb | 1.25 ± 0.28 | 7 × 4 | 不明显 Un-obvious | 0.032 | -0.063 |
| Zn | 15.14 ± 5.20 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | -0.762 * | 0.800 * |
| As | - | 7 × 4 | - | - | - |

¹⁾ R_d : 叶中重金属含量与距路侧距离的相关系数 Correlation coefficient between heavy metal content in leaf and the distance away from road edge; R_c : 叶中重金属含量与土壤中重金属含量的相关系数 Correlation coefficient between heavy metal content in leaf and heavy metal content in soil; -: 未检出 Undetected. *: $P < 0.05$.

2.2.2 稻叶中重金属元素的主成分分析 为了进一步了解 205 国道两侧稻叶中重金属元素的分异特征,对稻叶中的重金属元素分布进行了主成分分析,结果见表 3。

由表 3 可见,在 205 国道东侧,特征值大于 1 的主成分有 2 个,累积贡献率为 87.536%,已包含大部分重金属元素信息,具有较显著的概括性。其中,第 1 主成分与稻叶中 Al、Cd、Cu、Fe 和 Zn 等元素的含量有明显正相关性,且与 Cu 和 Fe 含量的相关性分别达到显著和极显著水平,可见这些重金属元素在公路环境中的演变方向是一致的;第 2 主成分与稻

叶中 Cr 和 Pb 含量有明显正相关性,且与 Pb 含量的相关性达到显著水平,可解释为稻叶中 Pb 含量可能主要来自土壤。

在 205 国道西侧,特征值大于 1 的主成分也有 2 个,累积贡献率为 77.174%。其中,第 1 主成分与稻叶中 Al、Cr、Cu、Fe、Ni 和 Zn 等元素的含量正相关,且与 Al、Cr、Fe、Ni 和 Zn 含量具有极显著的正相关性,表明稻叶中这些重金属元素含量明显受到公路环境污染物扩散沉降的影响;第 2 主成分与 Pb 含量呈极显著的正相关关系,也可解释为稻叶中的 Pb 含量可能主要来自土壤。

表 3 205 国道东西两侧稻叶中重金属元素分布的主成分分析结果¹⁾

Table 3 Result of principal component analysis of heavy metal distribution in rice (*Oryza sativa* L.) leaf from eastern and western sides of No. 205 national road¹⁾

| 主成分 Principal component | 相关系数 Correlation coefficient | | | | | | | | 特征值 Eigen- value | 贡献率/% Contribution rate | 累积贡 献率/% Cumulative contribution rate |
|-------------------------------|------------------------------|--------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|------------------------|-------------------------------|---|
| | Al | Cd | Cr | Cu | Fe | Ni | Pb | Zn | | | |
| 路东侧 Eastern side of road | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.933 | 0.938 | -0.242 | 0.955 * | 0.990 ** | -0.875 | 0.197 | 0.759 | 5.080 | 63.505 | |
| 2 | 0.040 | -0.205 | 0.847 | -0.103 | -0.068 | 0.003 | 0.975 * | 0.442 | 1.923 | 24.032 | 87.536 |
| 路西侧 Western side of road | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.970 ** | -0.545 | 0.965 ** | 0.641 | 0.931 ** | 0.911 ** | 0.277 | 0.905 ** | 5.172 | 64.652 | |
| 2 | -0.176 | 0.020 | -0.106 | 0.101 | -0.097 | 0.137 | 0.955 ** | -0.089 | 1.002 | 12.522 | 77.174 |

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

2.3 205 国道两侧糙米中重金属元素含量的分布特征和糙米食用品质评价分析

2.3.1 糙米中重金属元素含量的空间分布特征

205 国道两侧糙米中重金属元素含量的变化见表 4。由表 4 可知,205 国道西侧糙米中的 Al、Cd、Cr、Cu、Fe 和 Ni 等元素的含量均比东侧高,而东侧糙米中的 Pb 和 Zn 等元素的含量略高于西侧,表明西侧糙米受公路环境污染物扩散沉降影响比东侧明显。

在 205 国道两侧不同路侧距离内,糙米中的重金属元素含量大多有明显的峰值区域,但东侧糙米中的 Cd、Cu 和 Zn 含量以及西侧糙米中的 Cd 和 Zn 含量无明显峰值区域。在采自东侧的糙米中,Al 和 Fe 含量的峰值出现在距路侧 10 ~ 40 m 的区域内,Pb 含量的峰值出现在距路侧 10 m 的区域,Ni 含量的峰值区域距路侧最远,达到 200 m;在采自西侧的糙米中,Cr 含量峰值出现在距路侧 80 m 的区域,Al、Cu、Fe、Ni 和 Pb 含量的峰值均出现在距路侧

20 m 的区域内。

表 4 数据还表明,205 国道东侧糙米中的 Al、Fe 和 Pb 含量有随距路侧距离增加而递减的趋势,其中 Al 含量与距路侧距离呈显著负相关性;西侧糙米中的 Al、Cr、Cu、Fe、Ni 和 Pb 含量也具有随距路侧距离增加而递减的规律,其中 Fe 含量与距路侧距离呈显著负相关性,可见,糙米中 Al 和 Fe 含量的高低与汽车尾气扩散沉降有直接关联。

205 国道东西两侧糙米中重金属元素含量与土壤中重金属元素含量的相关分析结果表明(表 4),在采自东侧的糙米中,除 Fe 含量与土壤中的 Fe 含量正相关外,其他元素含量与土壤中相应的元素含量均呈负相关,相关性均不显著。在采自西侧的糙米中,只有 Cr 和 Ni 含量与土壤中的 Cr、Ni 含量正相关,其他元素含量均与土壤中相应元素含量负相关,且只有 Ni 含量与土壤中的 Ni 含量的相关性显著。

2.3.2 糙米食用品质的评价 在 205 国道两侧糙

米中未检出 As, 且 Al、Cd、Cr、Cu 和 Zn 等重金属元素的含量均未超过国家食品卫生标准^[13]的允许量(见表 4), 表明 205 国道两侧环境现状尚未造成糙米中重金属元素含量明显超标的后果。但 205 国道两侧部分糙米中的 Ni 和 Pb 等有害重金属元素含量超过国标限值, 其中东侧糙米中 Ni 的超标频度为 25.00%、Pb 的超标频度为 81.25%; 西侧糙米中 Ni

的超标频度为 85.71%、Pb 的超标频度为 14.29%; 东西两侧糙米中的 Ni 和 Pb 含量均有明显的超标峰值区域, 除东侧糙米中 Ni 含量峰值区域在路侧 200 m 外, 其余元素含量的峰值区域均在路侧 10~20 m 附近。测定结果表明, 205 国道两侧糙米中的 Ni 和 Pb 含量超标也与汽车尾气扩散沉降密切相关。

表 4 205 国道东西两侧糙米中重金属元素含量比较和相关性分析¹⁾

Table 4 Comparison of heavy metal content in brown rice (*Oryza sativa* L.) from eastern and western sides of No. 205 national road and correlation analysis¹⁾

| 元素 Element | 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Content | 样本数 Sample number | 峰值区域 Peak value range | 超标倍数 Surpassing times | 超标频度/% Frequency of exceeding standard | R_d | R_c |
|--------------------------|--|-------------------------|--|-----------------------------|--|----------|----------|
| 路东侧 Eastern side of road | | | | | | | |
| Al | 1.19 ± 0.22 | 4 × 4 | 路侧 10~40 m 10-40 m away from road edge | N | N | -0.976 * | -0.050 |
| Cd | 0.03 ± 0.03 | 4 × 4 | 不明显 Un-obvious | N | N | 0.869 | -0.740 |
| Cr | 0.00 | 4 × 4 | - | N | N | - | - |
| Cu | 2.55 ± 1.12 | 4 × 4 | 不明显 Un-obvious | N | N | 0.960 * | -0.138 |
| Fe | 12.26 ± 0.86 | 4 × 4 | 路侧 10~40 m 10-40 m away from road edge | - | - | -0.929 | 0.555 |
| Ni | 0.34 ± 0.13 | 4 × 4 | 路侧 200 m 200 m away from road edge | 0-0.80 | 25.00 | 0.985 * | -0.666 |
| Pb | 0.67 ± 0.09 | 4 × 4 | 路侧 10 m 10 m away from road edge | 0-0.80 | 81.25 | -0.751 | -0.046 |
| Zn | 17.43 ± 0.93 | 4 × 4 | 不明显 Un-obvious | N | N | 0.793 | -0.846 |
| As | - | 4 × 4 | - | - | - | - | - |
| 路西侧 Western side of road | | | | | | | |
| Al | 1.22 ± 0.50 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | N | N | -0.751 | -0.527 |
| Cd | 0.04 ± 0.02 | 7 × 4 | 不明显 Un-obvious | N | N | 0.375 | - |
| Cr | 0.02 ± 0.04 | 7 × 4 | 路侧 80 m 80 m away from road edge | N | N | -0.089 | 0.148 |
| Cu | 3.60 ± 0.27 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | N | N | -0.748 | -0.439 |
| Fe | 12.63 ± 3.53 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | - | - | -0.804 * | -0.069 |
| Ni | 0.51 ± 0.07 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | 0-0.68 | 85.71 | -0.707 | 0.818 ** |
| Pb | 0.38 ± 0.08 | 7 × 4 | 路侧 20 m 20 m away from road edge | 0-0.10 | 14.29 | -0.520 | -0.364 |
| Zn | 17.09 ± 2.58 | 7 × 4 | 不明显 Un-obvious | N | N | 0.315 | -0.436 |
| As | - | 7 × 4 | - | - | - | - | - |

¹⁾ R_d : 糙米中重金属含量与距路侧距离的相关系数 Correlation coefficient between heavy metal content in brown rice and the distance away from road edge; R_c : 糙米中重金属含量与土壤中重金属含量的相关系数 Correlation coefficient between heavy metal content in brown rice and heavy metal content in soil; -: 未检出 Undetected; N: 未超标 Un-exceeding standard. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 结论和讨论

频繁的交通运输以及汽车保有量的增加, 使得公路环境土壤中的重金属含量明显高于 20 世纪初。管东生对广州城市及近郊土壤重金属含量的研究表明, 城市土壤中的重金属含量普遍高于近郊土壤, 交通和工业活动是主要的影响因素, 路边土壤中的 Pb 和 Zn 污染最严重^[14]; 殷云龙等对南京市城乡公路绿地土壤重金属变化进行了研究, 结果表明, 与非公路环境的相对清洁点比较, 城乡公路土壤中的重金

属元素除 Al 增加不显著外, Fe、Cu、Mn 和 Zn 等元素的含量均显著增加, 且有害元素 As 和 Cd 的含量显著增加^[15]。作者的研究结果显示, 205 国道两侧无林带防护路段农田表层土壤中重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量水平达到土壤环境质量一级标准, As 含量超过土壤环境质量三级标准, 可见, 重金属元素已在 205 国道两侧的农田土壤中显著累积, 其中 As 的积累最严重。

汽车尾气属于流动型污染源, 其污染程度还受到风向的影响, 主导风向的下风向地区较上风向地区受影响的范围广^[16]。205 国道西侧表层土壤中的

Al、Cr、Fe、Ni、Zn 和 As 含量, 稻叶中的 Al、Cd、Cr、Fe 和 Ni 含量及糙米中 Al、Cd、Cr、Cu、Fe 和 Ni 含量均比东侧高, 表明西侧受公路汽车尾气扩散沉降影响比东侧明显, 与该地区的主风向为偏东风有关。

迄今为止, 人们普遍认为重金属污染随距公路距离的延长而降低^[17], 但李湘洲等发现, 公路旁表层土壤中的 Pb 含量并不与距公路垂直距离的远近呈简单的线性负相关关系, 而是先随距离的增加出现 1 个高峰值, 然后逐渐下降^[18]。作者的研究结果表明, 205 国道西侧表层土壤中的 Ni 和 Zn 含量和东侧土壤中的 Cd 含量、西侧稻叶中的 Al 和 Zn 含量、西侧糙米中的 Fe 含量和东侧糙米中的 Al 含量均有随距路侧距离增加而显著递减的规律, 且均有明显的峰值区域, 表明上述重金属元素的含量水平与公路汽车尾气扩散距离密切相关, 205 国道公路汽车尾气扩散沉降集中在距离公路 10~20 m 区域内。

许多研究表明, 重金属污染能够对公路两侧农作物的产量和品质造成影响^[5]。在 205 国道两侧的糙米中未检出 As, 与苏应生等的研究结果^[19]一致; Al、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量均未超出国家食品卫生标准, 但部分糙米样本中的 Ni 和 Pb 含量略有超标。由于重金属元素在生态系统中的生物富集和生物放大作用会引起农作物代谢失调、生长发育受阻或导致遗传变异, 并通过食物链直接威胁人们的健康与安全^[20], 因而, 了解国道两侧农田土壤和农作物中重金属分布的空间分异规律, 对指导公路绿化、有效防止重金属污染以及对公路两侧的农业结构调整和优化具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 李天杰, 宫世国, 潘根兴, 等. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

[2] 张辉, 马东升. 公路重金属污染的形态特征及其解吸、吸附能力探讨[J]. 环境化学, 1998, 17(6): 564-568.

[3] 曹立新, 李惕川, 刘莹, 等. 公路边土壤和水稻中铅的分布、累积及临界含量[J]. 环境科学, 1996, 16(6): 66-68.

[4] 阮宏华, 姜志林. 城郊公路两侧主要森林类型铅含量及分布规律[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 362-364.

[5] 李湘洲. 公路系统沿线作物铅累积状况的研究[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 40-42.

[6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

[7] 城乡建设环境保护部环境保护局. 环境监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1983.

[8] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 等. 宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 266-269.

[9] 吴永刚, 姜志林, 罗强. 公路边茶园土壤与茶树中重金属的积累与分布[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 26(4): 39-42.

[10] GB15618-1995, 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

[11] 庞金华. 上海郊县土壤和农作物中金属元素的污染评价[J]. 植物资源与环境, 1994, 3(1): 20-26.

[12] 董艺婷, 崔岩山, 王庆仁. 单一与复合污染条件下两种敏感性植物对 Cd、Zn、Pb 的吸收效应[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 1018-1024.

[13] 杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

[14] 管东生, 陈玉娟, 阮国标. 广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, 40(4): 93-96, 101.

[15] 殷云龙, 宋静, 骆永明, 等. 南京市城乡公路绿地土壤重金属变化及其评价[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 206-210.

[16] 陈建安, 林健, 兰天水, 等. 山区公路边土壤铅污染水平及其分布规律研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2001, 7(2): 5-8.

[17] 陈维新, 张玉龙, 陈中赫, 等. 沈阳东郊沈抚公路两侧土壤铅含量分布规律的初步研究[J]. 农业环境保护, 1990, 9(2): 10-13.

[18] 李湘洲. 机动车尾气对土壤铅累积的影响及分布格局[J]. 中南林学院学报, 2001, 21(1): 36-39.

[19] 苏应生, 曹宇, 谢明云, 等. 土壤单一或复合添加铜, 砷对水稻的影响[J]. 植物资源与环境, 1994, 3(4): 23-28.

[20] 甄宏. 交通运输对道路两侧土壤及植物的影响研究展望[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(1): 52-55.