

资源环境成本区域间潜在转移研究（内容提要）

李方一 中国科学院地理科学与资源研究所

1. 区域间虚拟水贸易（两区域间）

将产业部门的完全用水量近似看作该部门产品的虚拟水含量。产业部门虚拟水贸易量的计算方法如下：

（1）先求出产业部门直接用水系数：

$$q_i = W_i / X_i \quad (1)$$

其中， q_i 是 i 部门的直接用水系数； W_i 为第 i 部门直接用水量， X_i 为第 i 部门总产出，各部门的直接用水系数 q_i 构成用水系数行向量 $Q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 。

（2）由 Leontief 逆矩阵右乘各部门的直接用水系数行向量 Q ，得到本地完全用水系数行向量 H 。

$$H = Q(I - A)^{-1} \quad (2)$$

其中， I 是单位矩阵， A 为本地直接消耗系数矩阵， $(I - A)^{-1}$ 为本地投入产出模型下的 Leontief 逆矩阵，即本地产业乘数矩阵。行向量 $H=(h_1, h_2, \dots, h_n)$ ，其元素 h_i 为第 i 部门本地完全用水系数。

（3）单个产业部门的虚拟水含量计算公式为：

$$V_i = h_i \times C_i \quad (3)$$

其中， V_i 为第 i 部门的虚拟水含量， h_i 为第 i 部门本地完全用水系数， C_i 是本地对第 i 部门的最终使用。最终使用 C_i 可分为两种情况，一是本地消费，二是调出或出口，皆用产品的价值量表示。用于本地消费的产品所含有的虚拟水，可看作是本地的虚拟水消费，用于调出或出口的产品所含有的虚拟水，则看作本地的虚拟水出口。

（4）两区域多产业部门的虚拟水贸易量计算公式为：

$$W_{a-b} = W_{ab} - W_{ba} = \sum_{i=1}^n h_{ib} \times C_{ib} - \sum_{i=1}^n h_{ia} \times C_{ia} \quad (4)$$

其中， W_{a-b} 为 a 区域从 b 区域净调入的虚拟水量， W_{ab} 为 a 区域从 b 区域调入货物产生的虚拟水调入量， W_{ba} 为 a 区域向 b 区域调出货物产生的虚拟水调出量， h_{ib} 为 b 区域 i 产业部门的完全用水系数，单位为 $\text{m}^3/\text{万元}$ ， C_{ib} 为 a 区域从 b 区域 i 产业部门进口的产品的总价值，单位为万元， h_{ia} 为 a 区域 i 产业部门的完全用水系数， C_{ia} 为 a 区域 i 产业部门向 b 区域出口的产品的总价值， n 表示产业部门数目。根据公式（4），可计算全国任意两个省区的虚拟水贸易量。

本研究所采用的数据主要来自于中国 2007 年 30 省区市区域间流量计算模型（未包括西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区）。以距离衰减规律和同行业竞争规律为基础，模拟得到 30 省区市之间的贸易流量，然后使所有区域总的调入和调出达到平衡，从而构建

出完整的区域间投入产出表。根据公式 (1)，由产业总产值与直接用水量得到山西 25 个产业部门的直接用水系数，然后结合山西省 2007 年投入产出表，根据公式 (2) 和 (3)，计算得到各产业部门的完全用水系数和完全用水量。

基于 2007 年山西省与全国其他 29 个省区之间的贸易模型，得到农业部门与各工业部门的贸易额，根据公式 (4) 计算山西省与其他省区的工农业虚拟水贸易量。理论上，其他省区各产业部门的完全用水系数必须通过各省区投入产出表和直接用水系数才能得到，数据搜集难度大，因此用全国完全用水系数来代替，该系数由全国各产业直接用水系数与 2007 年全国投入产出表计算得到。

按照虚拟水的转移量方向与大小，将山西省的虚拟水贸易伙伴分为若干个等级。山西省农业虚拟水贸易伙伴分为 5 个等级，分别是来源地 4 个等级和目的地 1 个等级；山西省工业虚拟水贸易伙伴分为 7 个等级，分别是虚拟水来源地 4 个等级和调出目的地 3 个等级；综合考虑农业和工业虚拟水，将山西省的虚拟水贸易伙伴分为 7 个等级，分别是虚拟水来源地 3 个等级、基本平衡级和调出目的地 3 个等级。一级贸易伙伴的虚拟水贸易量最大，二级次之，三级再次之。山西省虚拟水贸易格局如图 1、图 2 和图 3 所示。

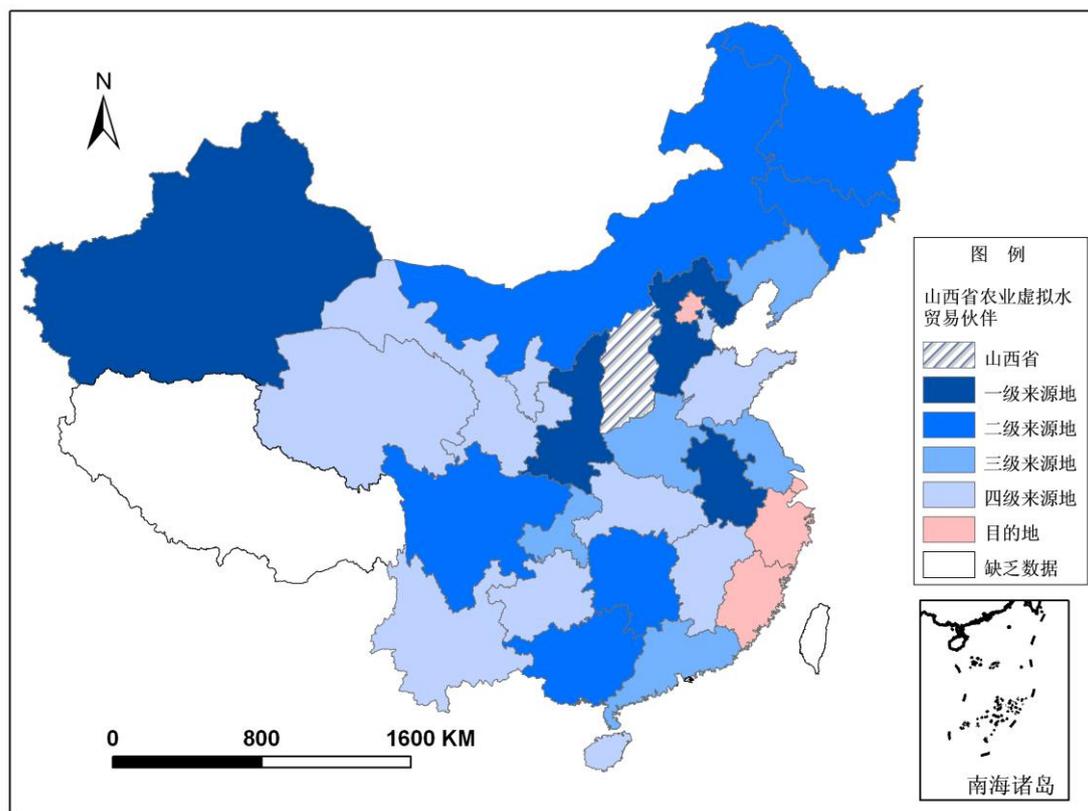


图 1 山西省农业虚拟水的贸易格局

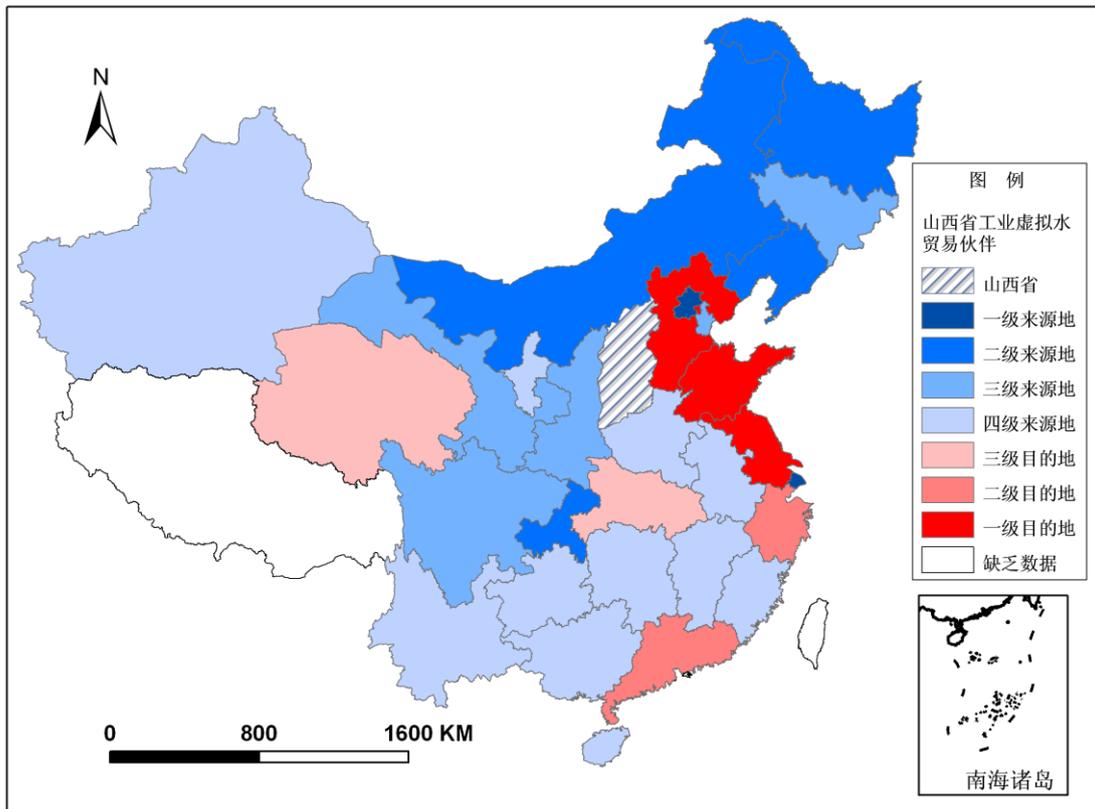


图 2 山西省工业虚拟水的贸易格局

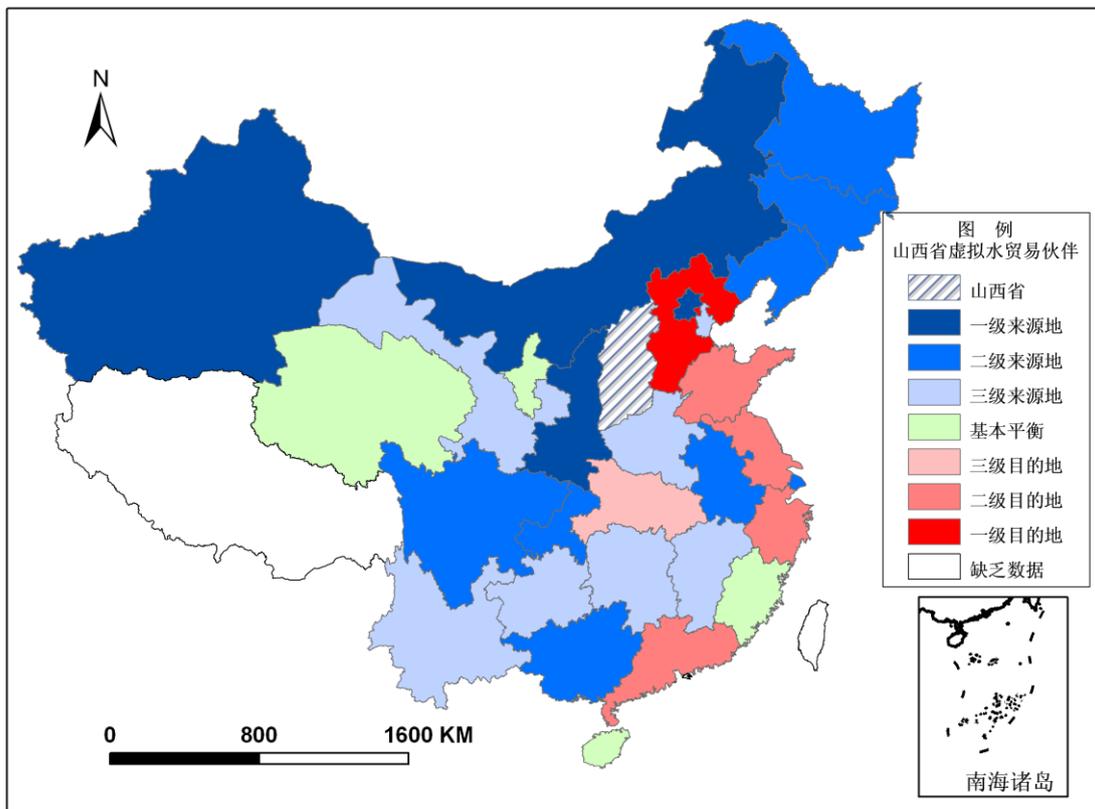


图 3 山西省工农业虚拟水的贸易格局

我国水资源的地域分布特征是南方水资源充沛，北方则短缺，山西省是单位面积水资源量较少的几个省份之一（见图 4）。对比山西省虚拟水贸易格局图与我国水资源量分布图，

发现山西省虚拟水的来源地并非水资源丰富的地区，而是水资源本来就短缺的西北地区。主要的虚拟水输出地则是水资源相对丰富的东部沿海地区。

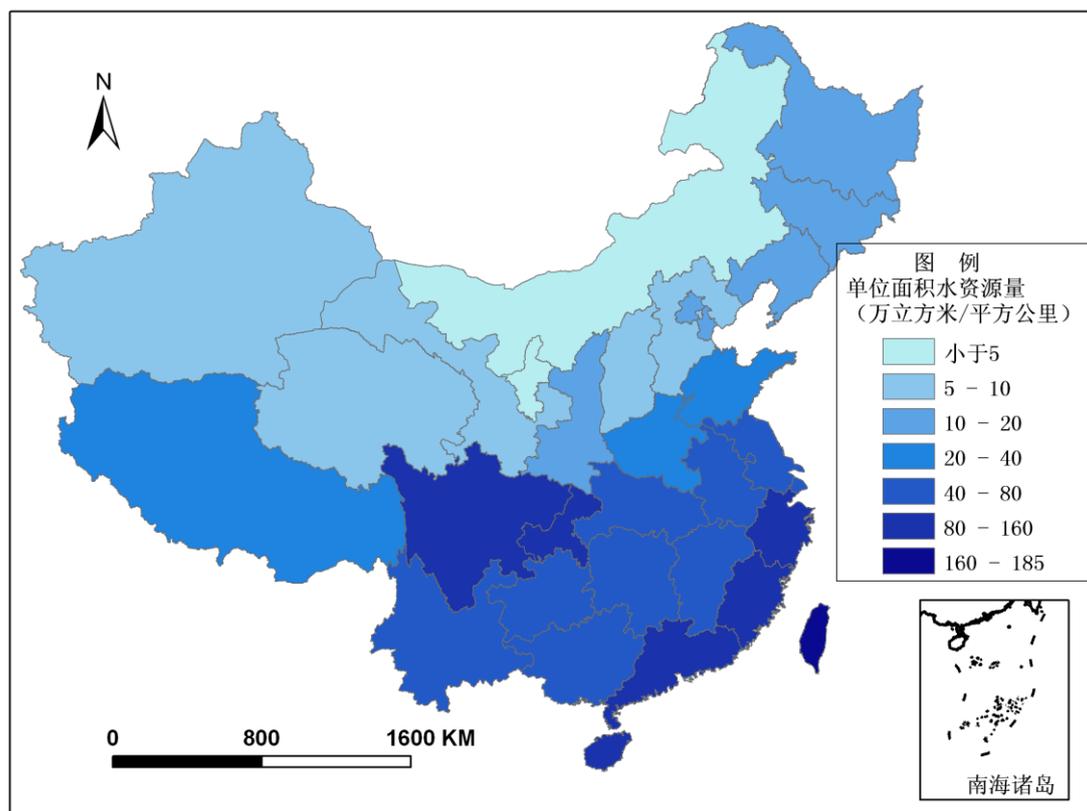


图 4 中国单位面积水资源量的空间分布

山西省煤炭资源丰富，煤炭开采和洗选业，以及主要依托煤炭资源发展起来的电力、热力的生产和供应业、金属冶炼及压延加工业，是主要的产值输出部门，同时也是主要的用水部门，使山西省的调出虚拟水大量隐含在高能耗产品中，显示出山西省全国能源基地的特点。由于山西省内油气资源和森林资源缺乏，山西省对石油、天然气和木材的消费主要来自于进口和调入。山西省工业部门类别不齐全，化学工业、机械设备制造业部门实力较弱，各类工业产品还需要从外省调入，因此在此类贸易中调入了大量的虚拟水。由此可见，调整产业结构是未来山西省调整虚拟水贸易结构的重要方法。

2. 区域隐含污染的转移（多区域间）

一般来说，工业产品的生命周期可分为三个阶段：首先是资源开采和产品生产，这一阶段需要消耗资源、排放污染物，如果缺少完善的污染处理设施，将造成环境污染；第二阶段是产品的销售、使用阶段，成型的工业产品在被使用的过程中很少产生污染，对环境的影响较小；第三阶段是产品使用后报废及报废以后被处理的阶段，不论是回收再利用，还是经过处理后排放到环境中，都会造成一定的环境影响。图 5 反映了绝大多数工业产品的生命周期与污染物排放之间的关系。污染物在产品生命周期中的非均衡排放，演变成了空间上的不平衡分配。

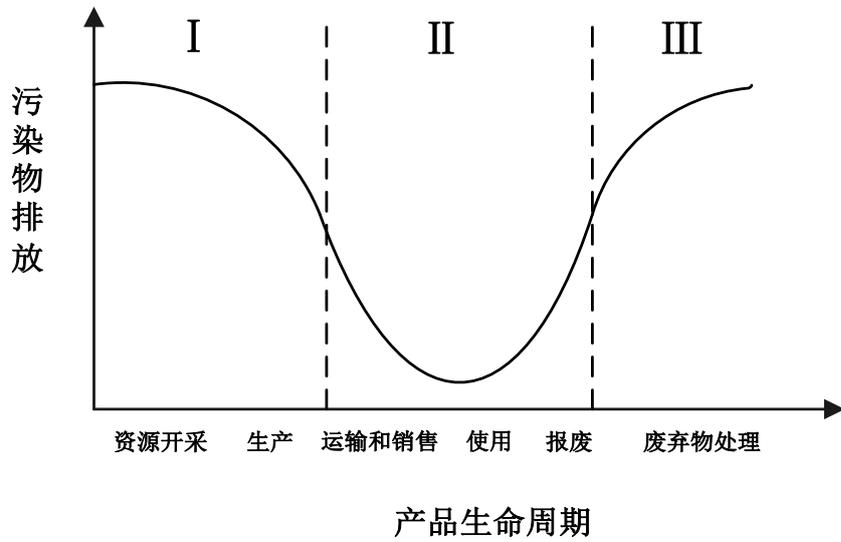


图 5 工业产品生命周期中的污染物排放特征

根据转移方式和载体的不同，将污染转移划分为不同的类型，如图 6 所示。第一类转移具有较强的隐蔽性，第二类和第三类转移在近年来受到了政府和公众的广泛关注。本研究主要分析第一类转移。

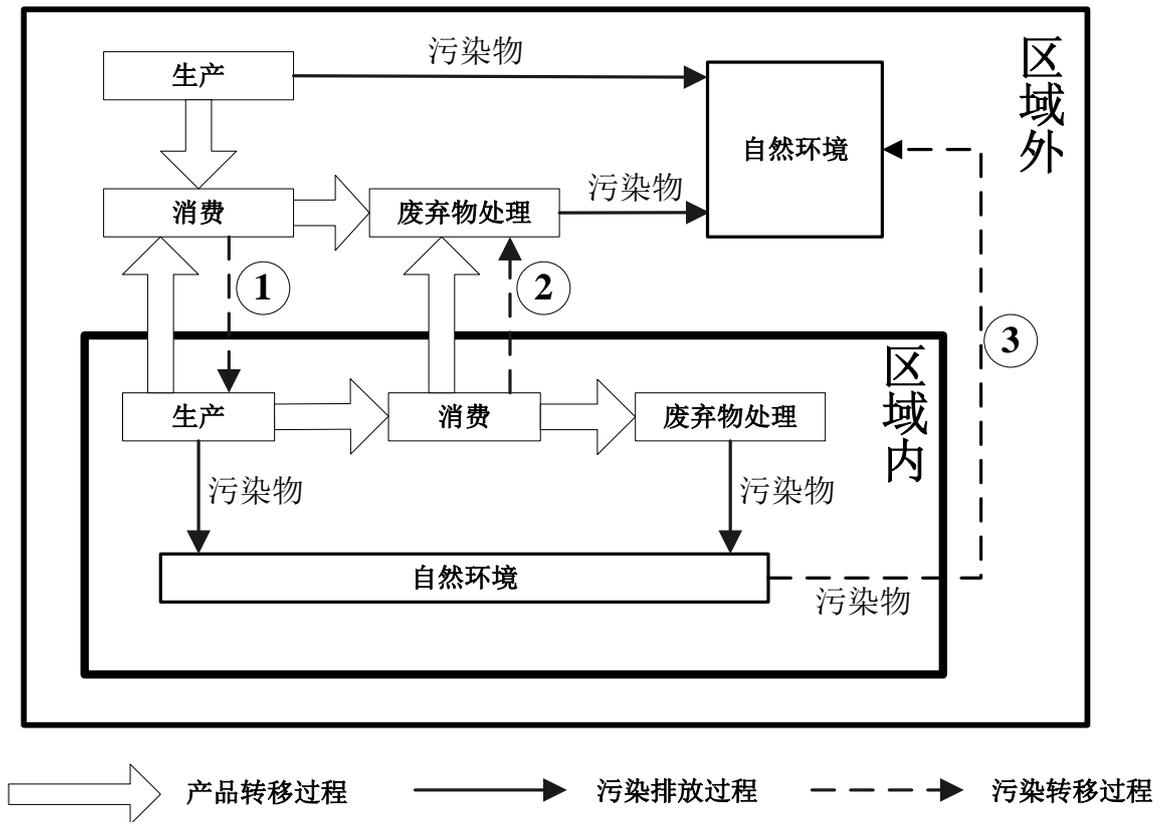


图 6 区域间污染转移示意图

构建隐含污染计量模型，计算区域工业直接排放量和完全排放量。从《中国环境统计年鉴》中获取各产业部门典型污染物的排放量，计算污染物直接排放系数。为了弥补数据上的缺陷，采取一些近似的方法，例如：省区市分部门直接排放系数采用全国值；不考虑农业、第三产业和生活产生的污染物排放，将农业与第三产业的直接排放系数设为零。模型计算步骤如下：

$$d_{ij} = W_{ij} / X_{ij} \quad (5)$$

其中， d_{ij} 是*i*区域*j*部门的污染物直接排放系数； W_{ij} 为*i*区域*j*部门生产过程中污染物直接排放量， X_{ij} 为*i*区域*j*部门总产出，设研究范围为*m*个区域的*n*个部门，则所有区域的所有部门的污染物直接排放系数 d_{ij} 构成直接排放系数行向量*D*，即

$$D = (d_{11}, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}, d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2n}, \dots, d_{m1}, d_{m2}, \dots, d_{mn})$$

基于中国 2007 年区域间非竞争型投入产出表^[33]，得到区域间直接消耗系数矩阵*A*，并计算得到 Leontief 逆矩阵 $(I - A)^{-1}$ ，由 Leontief 逆矩阵右乘污染物直接排放系数行向量*D*，得到污染物完全排放系数行向量*E*。

$$E = D (I - A)^{-1} \quad (6)$$

上式中， $(I - A)^{-1}$ 为 2007 年区域间投入产出表的 Leontief 逆矩阵，即产业乘数矩阵，其中*I*为单位矩阵。行向量*E*为

$$E = (e_{11}, e_{12}, e_{13}, \dots, e_{1n}, e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2n}, \dots, e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{mn})$$

其元素 e_{ij} 为*i*区域*j*部门污染物完全排放系数。污染物完全排放系数表示每增加一个单位最终使用时，经济系统各部门产生的污染物的数量。设*r*区域消费了*i*区域*j*部门的产品价值为 C_{rij} ，则这部分产品隐含的污染物 v_{rij} 由公式（7）计算得到：

$$v_{rij} = e_{ij} \times C_{rij} \quad (7)$$

则*r*区域消费*i*区域所有产品所隐含的污染物 V_{ri} 可由公式（8）得到：

$$V_{ri} = \sum_{j=1}^n e_{ij} \times C_{rij} \quad (8)$$

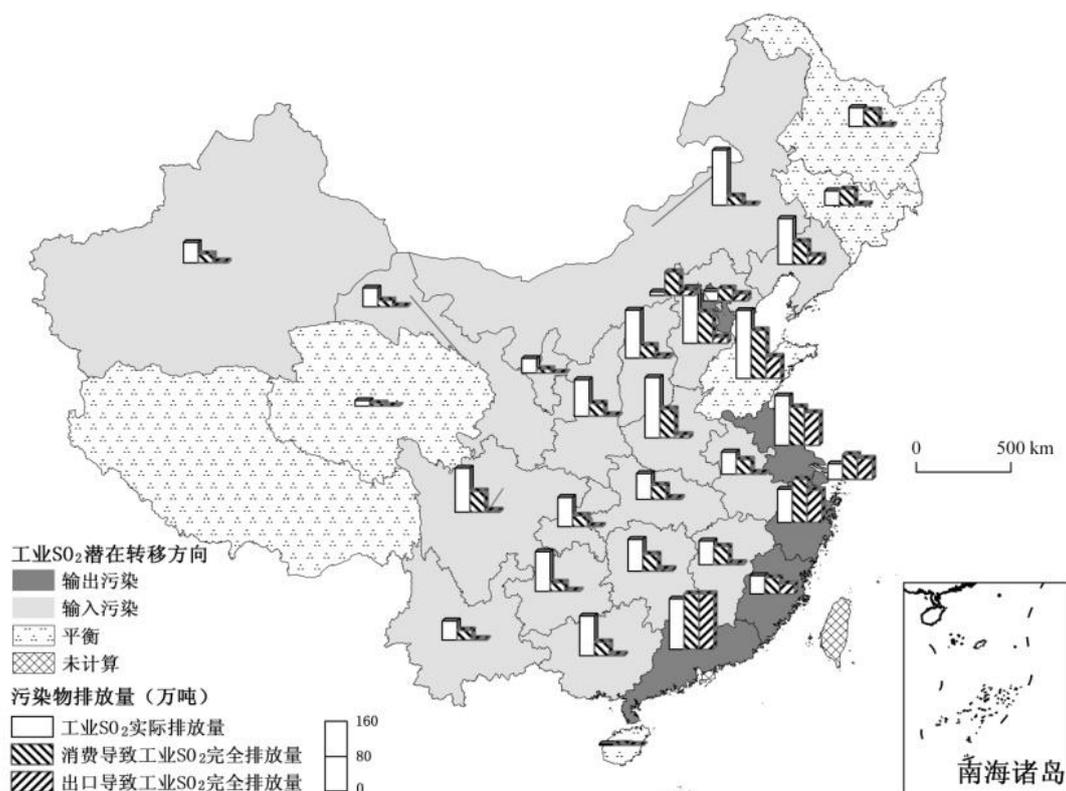
其中， V_{ri} 为*r*区域消费*i*区域的产品中隐含的污染物，即从消费者责任的角度看由*r*区域消费导致*i*区域产生的污染物排放。由公式（9）可计算*r*区域的隐含污染转移量。

$$U_r = \sum_{i=1}^m V_{ri} - W_r \quad (9)$$

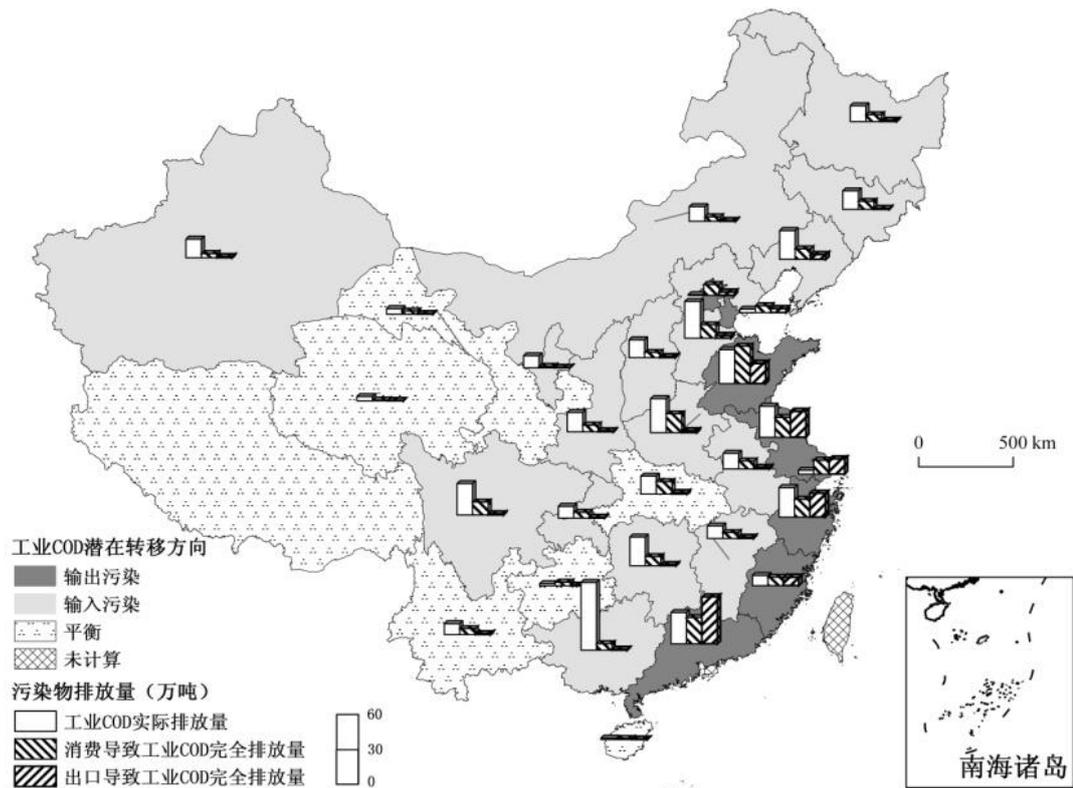
其中， $\sum_{i=1}^m V_{ri}$ 是区域*r*最终使用导致的污染物完全排放量， W_r 是*r*区域生产过程中的污染物直接排放量，二者之差为区域*r*的隐含污染物转移量 U_r 。若 U_r 为正数，则*r*区域向外输出了污染，反之则输入了污染。

出于数据获取的原因，以 2007 年为研究期，选取工业 SO₂、COD、固废和重金属四种典型污染物，计算区域间工业隐含污染转移量。由于各省区市固废排放量统计口径不一致，用固废产生量代替。各区域工业部门的污染物直接排放系数由全国值代替，根据公式（6）计算各部门完全排放系数。

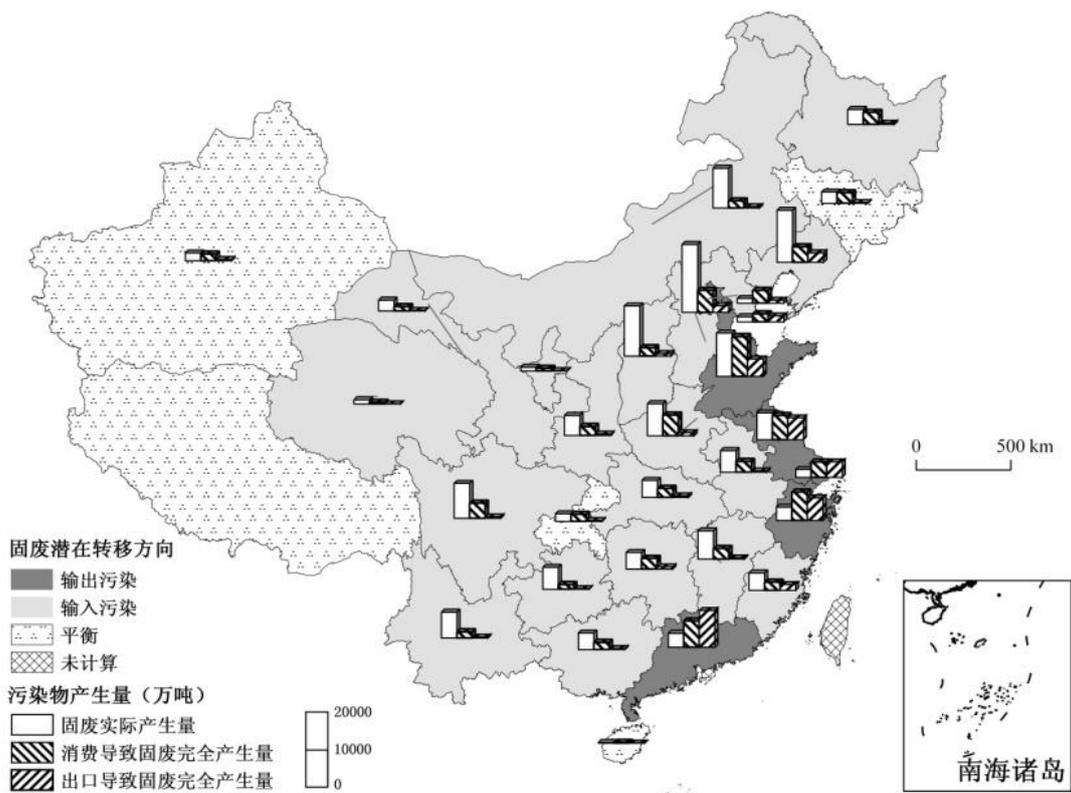
污染物完全排放系数高的部门主要是能源和原材料生产加工部门。基于污染物完全排放系数，结合各区域各部门消费数据，计算各区域污染物完全排放量。对比区域污染物的实际排放量和完全排放量，可得到区域隐含污染转移的方向和数量。实际排放量是本区域产业部门在生产过程中实际排放的污染物，完全排放量为满足区域最终需求而导致的污染物排放量。若完全排放大于实际排放，则该区域属于污染输出区，将满足自身最终需求的污染向区外转移；若完全排放小于实际排放，则该区域属于污染输入区，承担了其他区域转移来的污染；若二者接近，则该区域属于基本平衡区。分别计算各区域四种污染物的实际排放量和完全排放量，其中完全排放量分为消费导致排放量和出口导致排放量，消费包括居民消费、政府消费和固定资产增加，计算过程中未考虑进口。计算结果绘制于全国行政区划图上，如图7所示。



(a) 工业 SO₂



(b) 工业 COD



(c) 工业固体废弃物

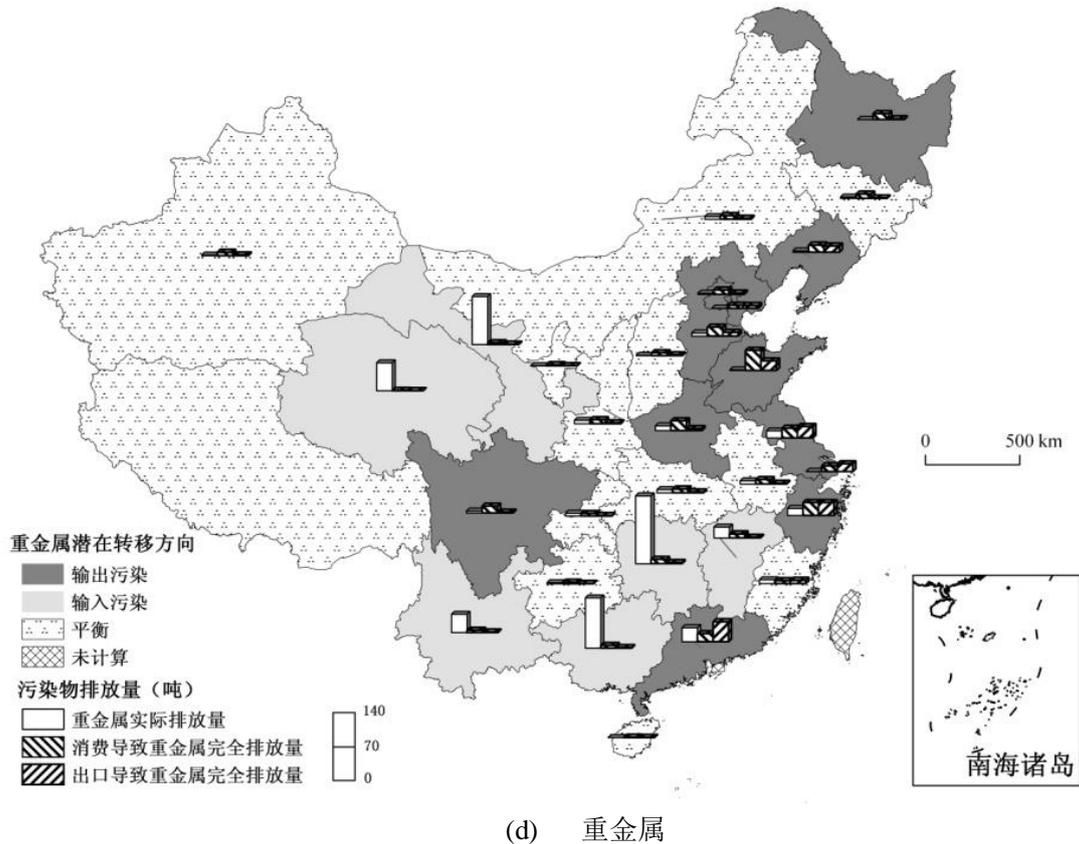


图 7 中国各区域污染物直接与完全排放

从图 7 看出，四种污染物的主要输出区域是北京、山东、江苏、上海、浙江和广东等沿海省份，而输入区域均位于中西部地区，重金属输入区域较为集中，为甘肃、湖南、广西、青海和云南五省区。我国污染物排放和转移格局与经济格局密切相关。东部地区是中国经济最发达的地区，人口集中、消费水平高，尤其是东南沿海地区，经济外向性高，地区生产总值占全国的一半以上，因此，完全污染物排放量高。中西部地区矿产资源、土地资源和劳动力资源丰富，近年来，随着工业化、城市化进程的加速推进，已建设成为我国重要的能源和原材料生产基地。但中西部地区城市化率和居民消费水平都较低，消费和出口对地区生产总值的拉动力不强，污染物完全排放量还处于比较低的水平。因此，形成了东部污染物完全排放量高、中西部污染物直接排放量高的空间格局，东部成为隐含污染的输出区域，中西部为输入区域。

根据各区域隐含污染的输入与输出量，得到该区域污染物转移的方向与绝对值。计算各区域每种污染物的转移相对值，将区域中最大转移量设为 1，其他区域为相对值，正向表示该区域为污染输出区，负向表示污染输入，结果在图 12 中展示。工业 SO_2 、COD、固废和重金属输入量最多的省份分别是内蒙古、广西、山西和湖南。按照隐含污染转移的方向与大小，将各区域分为若干等级。污染物的输出区域分 3 个等级，输入区域分 3 个等级，其中第一级污染物转移量最高，第二级次之，第三级最低，如图 8 所示。

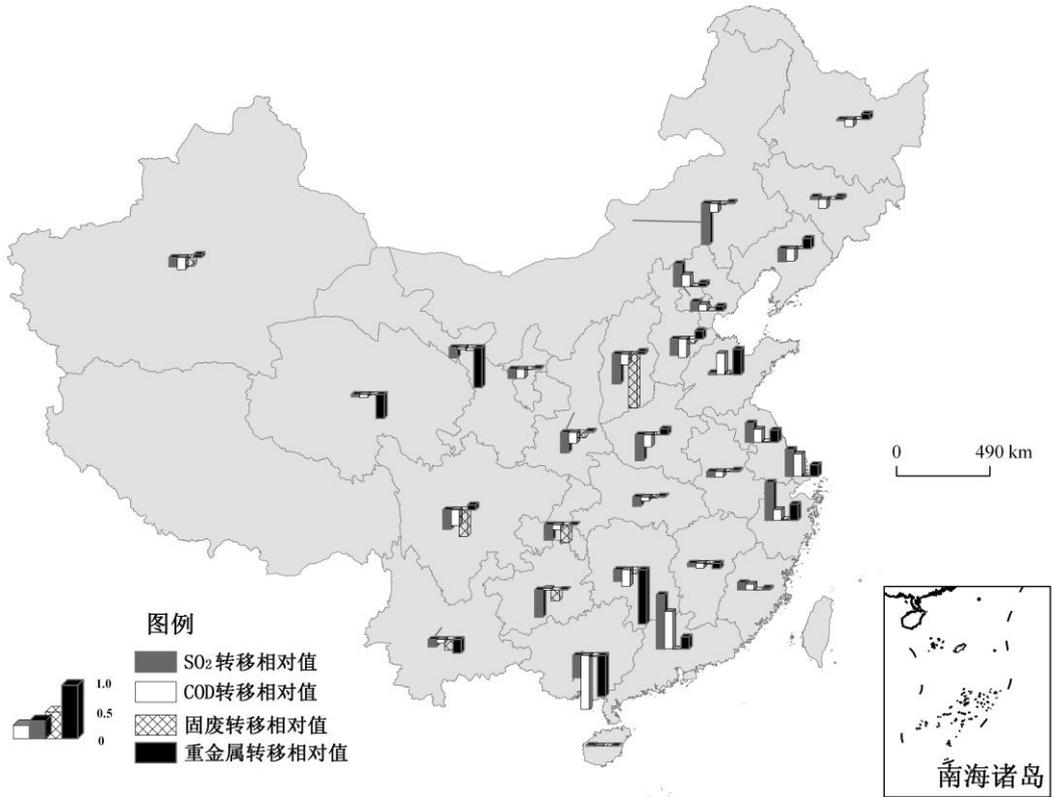


图 8 中国各区域污染转移的方向与相对值

	工业SO ₂	工业COD	工业固体废弃物	重金属
输出区域	第一级：粤、浙 第二级：沪、苏 第三级：京、津、闽	第一级：粤 第二级：鲁、沪 第三级：京、苏、浙	第一级：鲁 第二级：苏、浙、沪 第三级：京、津、豫等	第一级：鲁 第二级：苏、浙、粤 第三级：冀、辽、沪等
↓				
输入区域	第一级：蒙、晋 第二级：豫、黔、桂 第三级：冀、川、陕等	第一级：桂 第二级：冀、豫、川 第三级：晋、湘、辽等	第一级：晋 第二级：川、渝 第三级：黔、疆等	第一级：湘、桂、陇 第二级：陕、青 第三级：滇、赣

图 9 中国隐含污染转移格局图

污染物大多从江苏、浙江、广东、山东、北京和上海等经济发达地区向内陆欠发达地区转移，故推测隐含污染转移可能与区域经济发展水平相关。以 2007 年 30 省区市的面状数据为基础，以区域人均消费水平和人均地区生产总值两个指标代表区域的经济发展水平，运用相关性分析方法研究区域人均污染物转移量 f 与区域经济发展指标的关系。人均污染物转移量 f 根据公式 (10) 计算得到。

$$f_p = \frac{V_p - W_p}{N_p} \quad (10)$$

其中, f_p 是区域 p 的人均污染物转移量, V_p 是区域 p 的污染物完全排放量, W_p 是区域 p 的污染物实际排放量, N_p 是区域 p 的常住人口。

相关性分析结果见表 1, 人均工业 SO_2 、COD 和固废的转移量与人均消费水平、人均地区生产总值呈现出显著的相关关系, 表明区域经济越发达, 向外转移的污染物数量越多, 而经济落后区域往往承接了发达地区的污染转移。人均重金属转移量与经济发展指标的相关性较差, 主要是因为重金属排放集中在有色金属矿采选业和加工业这两个部门, 其排放量占所有部门排放总量的 65%。我国有色金属资源主要分布在湖南、广西、甘肃等省, 导致金属矿采选和加工业集聚度高, 因此, 重金属转移格局与经济发展水平相关性不高。

表 1 污染物转移与经济发展水平的相关性分析

	人均 SO_2 转移量	人均 COD 转移量	人均固体废弃物转移量	人均重金属转移量
人均消费水平	0.771**	0.734**	0.930**	0.319
人均地区生产总值	0.750**	0.723**	0.915**	0.342

**表示在 0.01 的水平上显著相关。

综上所述, 大部分隐含污染转移的方向与数量与区域的经济水平密切相关, 我国区域间贸易使工业隐含污染由经济发达的东部沿海地区向相对落后的中西部地区转移。

综上所述, 通过区域间贸易, 我国东部沿海地区向中西部地区转移了工业污染, 污染转移的方向和数量与区域经济发展水平有较强的相关性, 由人均消费高的地区向人均消费低的地区转移。本文从地理学角度研究了我国工业产品隐含污染的区域转移, 阐明其空间格局和一般规律, 对区域产业政策、环境保护政策和生态补偿政策的制定提供了重要依据。