

# 江苏省东部沿海地区浅层地下水化学类型及质量评价研究

王佳琪

## 1. 研究背景

江苏省东部沿海地区主要包括连云港、盐城、南通三个苏北城市（图 1）。自沿海开发国家战略实施以来，沿海三市抓住机遇，实现快速发展，成为全省增长速度最快、发展活力最强、开发潜力最大的区域之一。目前，江苏省东部沿海地区已成为我国沿海重要的新型工业基地<sup>[1]</sup>。



图 1 研究区自然地理位置和交通示意图<sup>[1]</sup>

研究区处于北亚热带向暖温带过渡地带，受季风气候控制，同时还受海洋性和大陆气候的影响。研究区的平均年降雨量在 1000 mm 左右，地表水发育（图 1），水量丰沛。尽管如此，研究区的地下水开采历史可以追溯到十九世纪五六十

年代，且 2000 以来，尽管在开采政策的管理之下，沿海地区的深层地下水开采量逐年递减，但是直至 2013 年，盐城和南通的开采量依然超过 0.5 万  $\text{m}^3/\text{a}$ （图 2）。沿海地区至今还保存着许多浅层民用井，并且部分浅层民用井还依然在使用中。因此，有必要对沿海地区浅层地下水水化学类型以及水质情况进行研究。

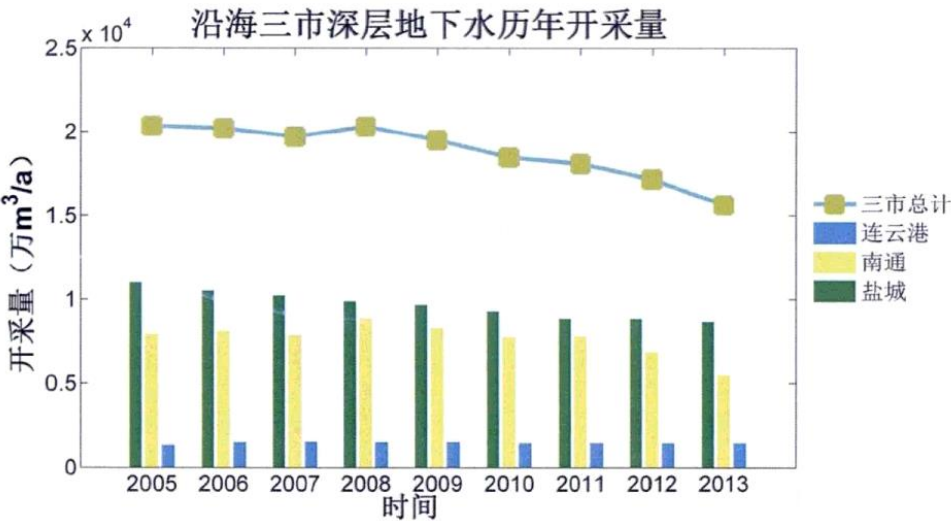


图 2 沿海地区深层地下水开采历史<sup>[2]</sup>

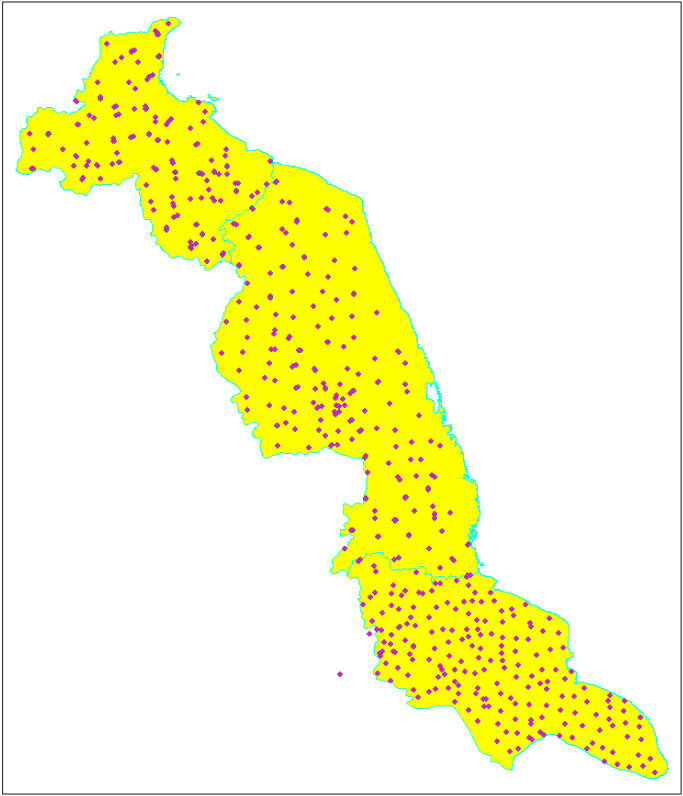


图 3 沿海地区采样点分布

2015 年前后，在沿海地区开展了一次大规模的浅层地下水样品采集，全区共布设 644 个采样点（图 3）。参考 1994 年实行的《中华人民共和国地下水质量标准》中涉及的地下水质量分类指标<sup>[3]</sup>，对地下水样品进行水化学指标测试和分析。

## 2. 研究目的和方法

### 2.1 研究目的

由于沿海地区浅层民用井依然被广泛使用，因此，需要对沿海地区浅层地下水水化学类型以及水质情况进行研究，为浅层地下水的使用提供指导意见。

### 2.2 研究方法

利用 Piper 三线图和苏林分类对沿海地区浅层地下水水化学类型进行分析。地下水质量的评价方法使用 1994 年实行的《中华人民共和国地下水质量标准》中提出的综合评分法<sup>[3]</sup>。

## 3. 地下水化学类型

地下水化学类型分别采用 Piper 三线图和苏林分类两种方法来进行研究。

### 3.1 Piper 三线图

Piper 三线图选取  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  这 8 个离子数据来进行地下水类型的判别和分析。Piper 三线图由三部分组成（图 4），左下方的三角形显示阳离子的毫克当量百分数，右下角的三角形显示阴离子的毫克当量百分数，两边三角形延伸至上方菱形成一个交点，能够较为整体地反映水样阴阳离子的含量和水化学特征<sup>[4]</sup>，根据阴阳离子的不同含量，上方菱形可以分为多个区域（图 4），例如 1 区表示碱土金属离子超过碱金属离子。Piper 三线图能够较为全面且直观地反应水样中离子的分布特征和水化学类型，目前 Piper 三

线图被广泛用于分析地下水化学类型。

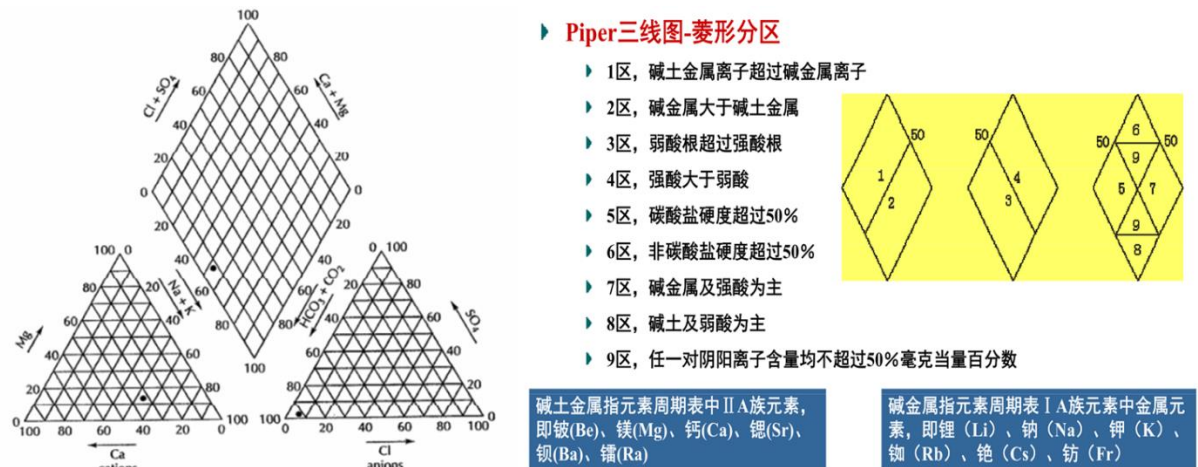


图 4 Piper 三线图简单图示

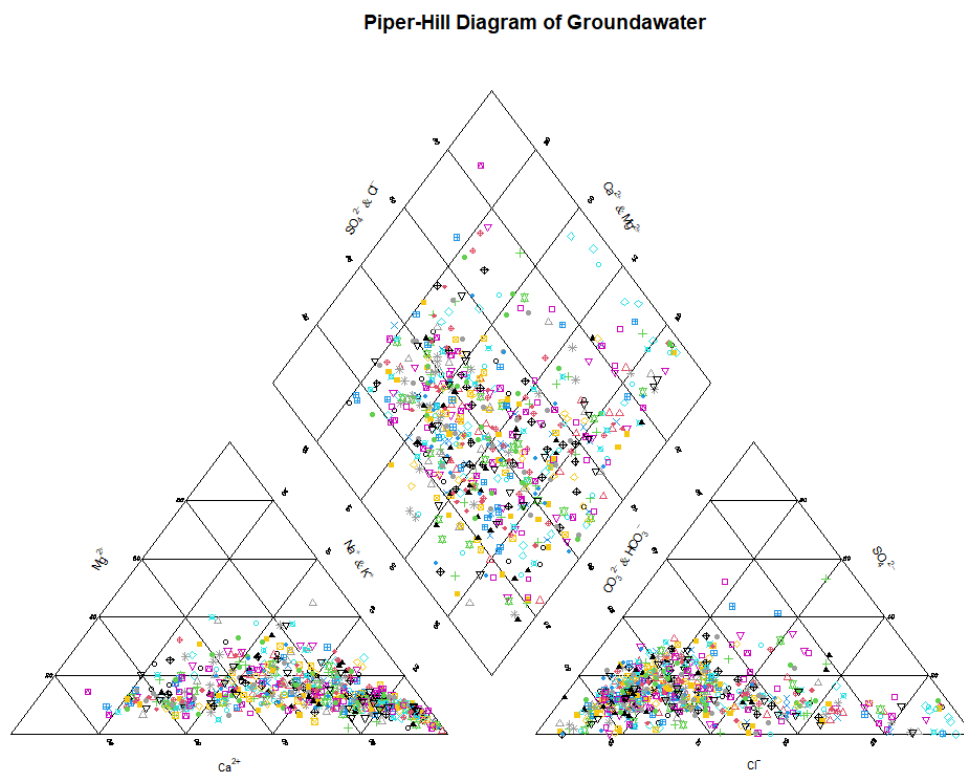


图 5 研究区 644 个水样的 Piper 三线图

研究区 644 个采样点在 Piper 三线图上的分类结果如图 5 所示, 阴阳离子的浓度变化范围较大, 表示研究区各离子浓度在空间上的变化十分大, 左下角的三

角形显示研究区阴离子有  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  偏高的趋势。由于全部 644 个水样的分布不能够很好地显示研究区的水化学类型，因此，分别选取位于北部连云港地区、南部南通地区的部分水样，进行 Piper 三线图分析，结果如图 6 和图 7 所示。连云港地区的 Piper 三线图与全区的结果相差不大，具有  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  偏高的趋势，而南部南通地区的水样有高  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  且高  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  的水化学分布特征。根据 Piper 三线图的结果推测研究区主要地下水化学类型为重碳酸型水。

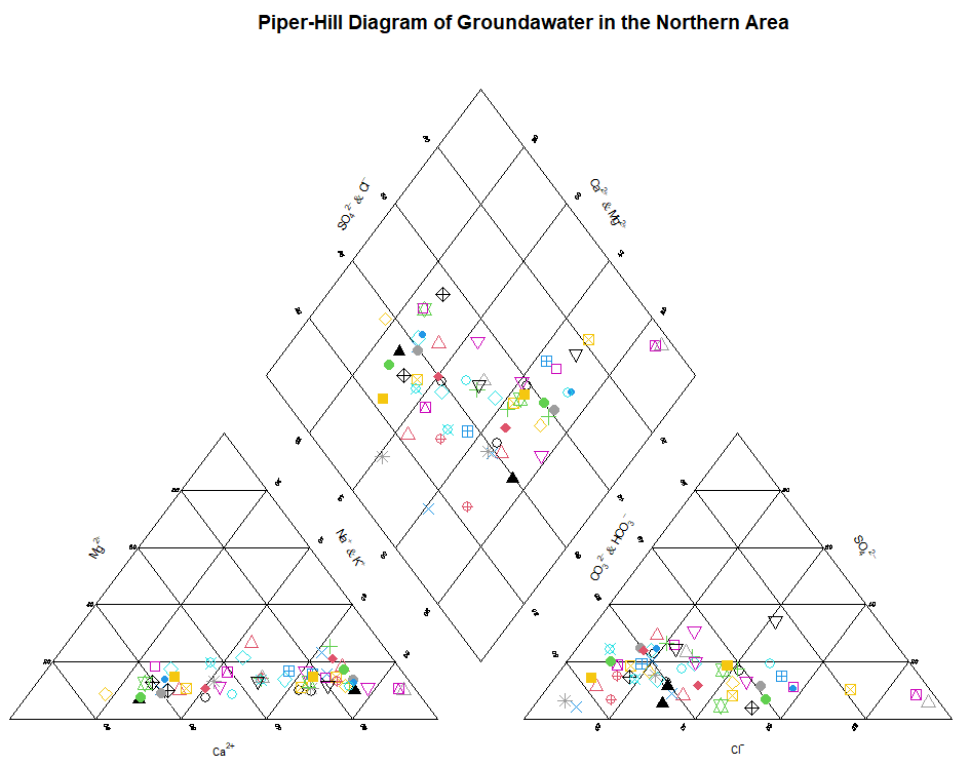


图 6 研究区北部地区水样的 Piper 三线图

Piper-Hill Diagram of Groundwater in the Southern Area

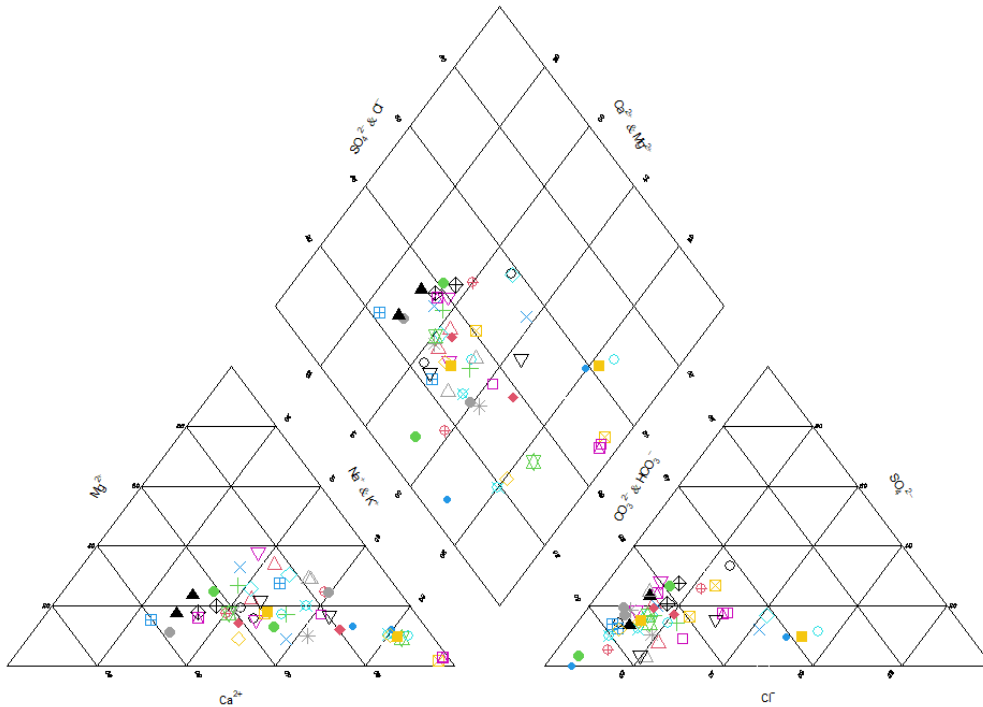


图 7 研究区南部地区水样的 Piper 三线图

### 3.2 苏林分类

地下水的化学特征受到气候、地质等多种因素的影响，因此，地下水离子浓度的空间异质性非常显著，如上文中的 Piper 三线图所示，水化学特征在空间上的变化十分大，因此仅根据 Piper 三线图不能够细化研究区的地下水化学类型。原苏联地球化学家苏林提出了根据地下水宏量组分  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  之间毫克当量比值将地下水划分为  $\text{NaHCO}_3$  型、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型、 $\text{MgCl}_2$  型和  $\text{CaCl}_2$  型水<sup>[5]</sup>，具体的分类方法如图 8 所示。对研究区 644 个水样进行苏林分类计算，结果如图 9 所示，研究区以  $\text{NaHCO}_3$  型水、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水为主，其中  $\text{NaHCO}_3$  型水在全区的百分比高达 44%，而  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水为 33%。除了位于连云港最北部的山区以外， $\text{NaHCO}_3$  型水在整个研究区都有分布，而  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水集中分布在连云港和南通，在盐城分布较少（图 10）。

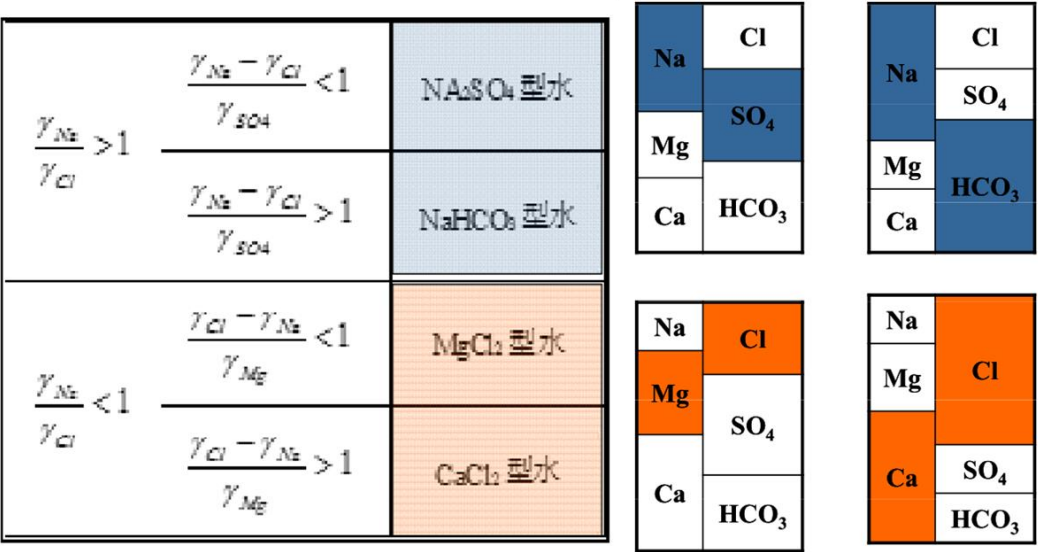


图 8 苏林分类方法

Sunlin Classification

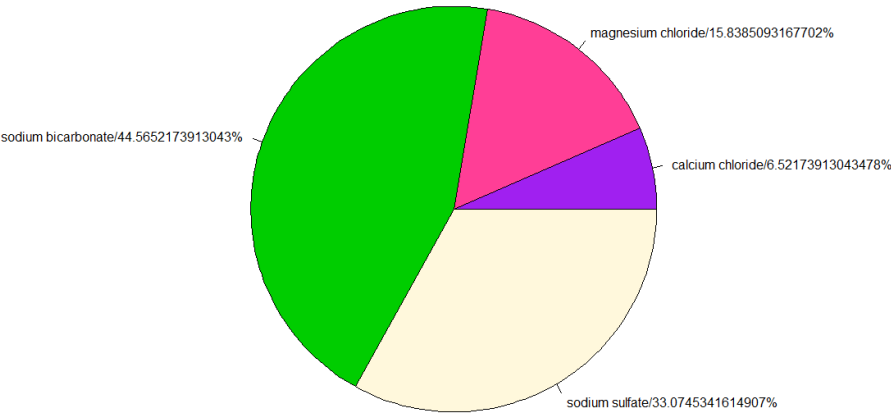


图 9 苏林分类结果

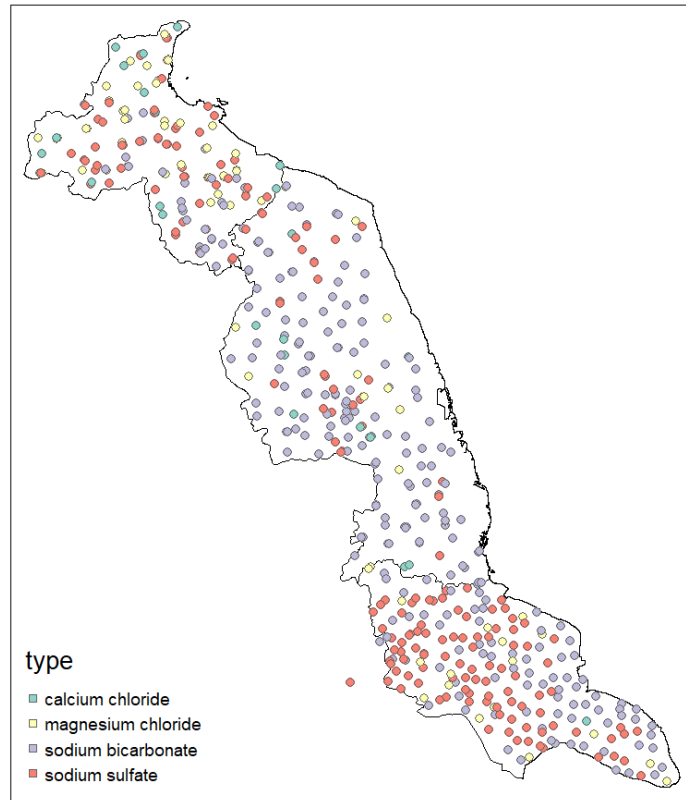


图 10 苏林分类结果的空间分布情况

溶解性总固体（total dissolved solids, TDS）是指水中溶解组分的总量，包括溶解于水中的各种离子、分子、化合物的总量，但不包括悬浮物和溶解气体。按照 TDS 的大小可将地下水分为淡水（ $\text{TDS} < 1000 \text{ mg/L}$ ）、微咸水（ $1000 \text{ mg/L} < \text{TDS} < 2000 \text{ mg/L}$ ）、咸水（ $2000 \text{ mg/L} < \text{TDS} < 3500 \text{ mg/L}$ ）、卤水（ $\text{TDS} > 3500 \text{ mg/L}$ ）。如图 11 所示，研究区广泛分布微咸水和咸水，推测与沿海地区海水入侵、古海水贮存以及海相沉积物有关。另外，除位于连云港最北部的山区以外，研究区广泛分布  $\text{TDS} > 1000 \text{ mg/L}$  的水样，其中，盐城分布有较多  $\text{TDS} > 2000 \text{ mg/L}$  的水样点，推测受到研究区地下水开采的影响，地下水持续开采导致水位下降，海水入侵，使得淡水咸化，如图 2 所示，盐城的地下水开采量最大，导致盐城的地下水咸化趋势最明显。结合苏林分类和 TDS 的特征可得，研究区地下水以  $\text{NaHCO}_3$  型水、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水为主，且大都属于微咸水和咸水。



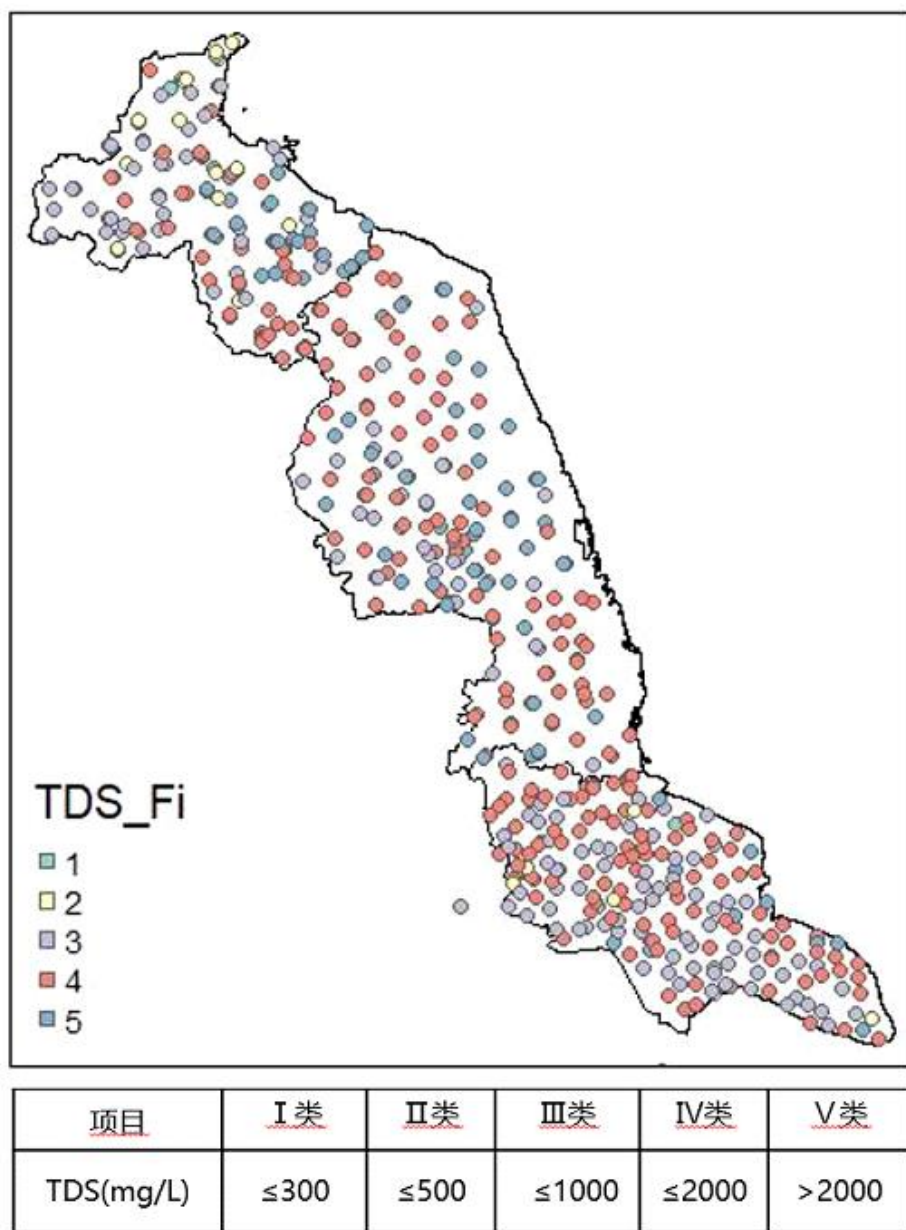


图 11 TDS 空间分布情况

NaHCO<sub>3</sub> 型水、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 型水的主要成因考虑以下三个方面：1) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 型水是大陆盐化潜水的主要类型；2) NaHCO<sub>3</sub> 型水、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 型水是两种典型的渗入成因地下水；3) 可能受研究区补给排泄及蒸发浓缩的影响。对于渗入成因的 NaHCO<sub>3</sub> 型水来说，其主要的形成作用包括阳离子交替吸附作用、脱硫酸作用和风化作用。研究区是典型的沿海地区，受潮汐作用的影响，当海退作用发生之后，在海退不久的地方，富含 Ca<sup>2+</sup> 的陆地水与富含吸附状 Na 的刚形成的海相沉积物

会发生阳离子交替吸附作用从而形成  $\text{NaHCO}_3$  型水。对于渗入成因的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水来说，其形成条件与地层的物理化学性质有关，例如含钠长石的侵入岩地区、硫化矿床、含煤地层、含芒硝/石膏的盐矿区都有利于  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水的形成。江苏东部沿海地区是由沂沭河、黄河、淮河和长江所携带的大量泥沙堆积形成的广袤的冲积、海积平原，具有沉积结构<sup>[1]</sup>，在其中贮存的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水通常是由混合作用、水岩作用和阳离子交替吸附作用的产物，例如， $\text{CaSO}_4$  或者  $\text{MgSO}_4$  水与富含吸附状 Na 的海相沉积物之间发生阳离子交替吸附作用从而形成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水。海水的潮汐作用以及海水入侵都会对海相沉积物吸附 Na 产生影响。根据上述对 TDS 的分析可知，盐城由于地下水开采量大，地下水位下降，海水入侵导致淡水咸化趋势最为明显，理论上来说更有利于形成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型，但是  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水在盐城的分布较少，而盐城主要广泛分布  $\text{NaHCO}_3$  型水，这一现象的出现可能与研究区地下水径流排泄条件有关。研究区的潜水水位受地形地貌控制较为明显，地下水水位具有自北向南变低的整体趋势<sup>[1]</sup>，地下水具有向南部排泄的趋势。盐城相比南通地下水水位偏高，沿地下水排泄方向，地下水会表现出由  $\text{HCO}_3$  型水向  $\text{SO}_4$  型水过度的趋势，从而导致在地下水水位较低的南通地区广泛分布  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水。其次，对于连云港地区来说，其最北部为山区，受连云港区域内部地形起伏以及地下水水位变化较大的影响，连云港地区分布有  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水。研究区地下水以大气降雨入渗为主，灌溉水回渗、地表水体侧向补给为辅，潜水以蒸发、人工开采及补给地表水体形式排泄，蒸发浓缩作用是  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水形成的又一个有利条件。

#### 4. 地下水质量评价

地下水质量的评价方法使用 1994 年实行的《中华人民共和国地下水质量标

准》中提出的综合评分法<sup>[3]</sup>。该标准中包含 39 个分类指标，但由于在实际过程中测试不充分的原因，经过对数据进行筛选之后（删除缺少数据的指标），共有 14 个指标、644 个水样参与研究区地下水质量评价，如表 1 所示。

表 1 研究区地下水质量评价分类指标及分类标准<sup>[3]</sup>

序号	项目	I 类	II 类	III类	IV类	V 类
1	总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> , 计)(mg/L)	≤150	≤300	≤450	≤550	>550
2	溶解性总固体(mg/L)	≤300	≤500	≤1000	≤2000	>2000
3	硫酸盐(mg/L)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
4	氯化物(mg/L)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
5	锰(Mn)(mg/L)	≤0.05	≤0.05	≤0.1	≤1.0	>1.0
6	挥发性酚类(以苯 计)(mg/L)	≤0.001	≤0.001	≤ 0.002	≤0.01	>0.01
7	硝酸盐(以 N 计)(mg/L)	≤2.0	≤5.0	≤20	≤30	>30
8	亚硝酸盐(以 N 计)(mg/L)	≤0.001	≤0.01	≤0.02	≤0.1	>0.1
9	氨氮(NH <sub>4</sub> )(mg/L)	≤0.02	≤0.02	≤0.2	≤0.5	>0.5
10	氰化物(mg/L)	≤0.001	≤0.01	≤0.05	≤0.1	>0.1
11	汞(Hg)(mg/L)	≤ 0.00005	≤0.0005	≤ 0.001	≤0.001	>0.001
12	砷(As)(mg/L)	≤0.005	≤0.01	≤0.05	≤0.05	>0.05
13	镉(Cd)(mg/L)	≤0.0001	≤0.001	≤0.01	≤0.01	>0.01

14	铅(Pb)(mg/L)	$\leq 0.005$	$\leq 0.01$	$\leq 0.05$	$\leq 0.1$	$> 0.1$
----	-------------	--------------	-------------	-------------	------------	---------

首先进行单项组分的评价，根据表 1 中的分类标准划分单项组分所属类别。单项组分评价按表 1 的标准分为五类，当不同类别标准值相同时，遵从“从优不从劣”的原则，例如，锰的 I 类、II 类标准值均为 0.05 mg/L，若水质分析结果为 0.02 mg/L 时，应定为 I 类，而不是 II 类。然后，根据表 2 中的评分原则给单项组分所属类别赋分值。最后计算该水样点的综合分值 $F$ ：

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{max}^2}{2}}$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$$

式中： $\bar{F}$ 表示各单项组分评分值 $F_i$ 的平均值； $F_{max}$ 表示单项组分评分值 $F_i$ 的最大值； $n$ 表示参与评价的分类指标个数， $n = 14$ 。最后，根据表 3 的标准划分地下水质量级别<sup>[3]</sup>。

表 2 单项组分评分标准<sup>[3]</sup>

类别	I	II	III	IV	V
$F_i$	0	1	3	6	10

表 3 地下水质量级别判别标准<sup>[3]</sup>

类别	优良	良好	较好	较差	极差
$F$	$\leq 0.80$	$\leq 2.50$	$\leq 4.25$	$\leq 7.20$	$> 7.20$

#### 4.1 单项组分评价结果

根据《中华人民共和国地下水质量标准》，I 类、II 类和III类水均适用于集中式生活饮用水水源及工、农业水；IV类水以农业和工业用水要求为依据，除适用于农业和部分工业用水外，适当处理后可作生活饮用水；V类水不宜饮用，其

他用水可根据使用目的选用<sup>[3]</sup>。由此可见，Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类水适用于饮用水，Ⅳ类、Ⅴ类水不能直接适用于饮用水。对于 644 个水样点单项组分评价的结果如图 12 所示，对于单项组分来说，Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类水占比总和超过 50%的组分包括总硬度、硫酸盐、氯化物、挥发性酚类、硝酸盐、亚硝酸盐、铅、镉、砷、汞、氰化物和氨氮，其中，总硬度、溶解性总固体、硝酸盐组分的Ⅲ类占比超过 20%。Ⅳ类、Ⅴ类水占比总和超过 30%的指标包括总硬度、溶解性总固体、氯化物、锰和亚硝酸盐，氨氮和砷的Ⅳ类、Ⅴ类水占比总和小于 30%，其中溶解性总固体和锰的Ⅳ类、Ⅴ类水占比总和较高，分别达到 59%和 56%。

4.1 地下水质量综合评价结果

研究区地下水质量情况不容乐观,较好和良好的地下水占比总和不超过 15%。研究区以较差和极差的地下水为主，其中极差地下水占比超过 50%（图 13）。较好和良好地下水零星分布在连云港北部地区和南通南部地区，中部地区地下水整体质量非常差，大部分地区综合评分 $F$ 大于 8，连云港和盐城东部交界处的地下水质量最差，综合评分 $F$ 结果超过 10（图 14）。

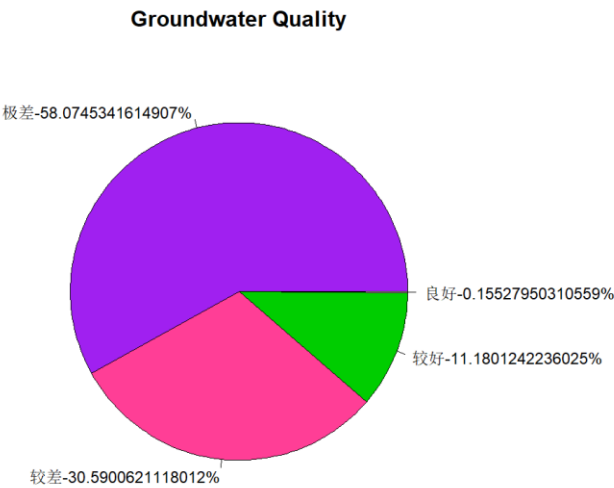


图 13 地下水质量综合评价结果

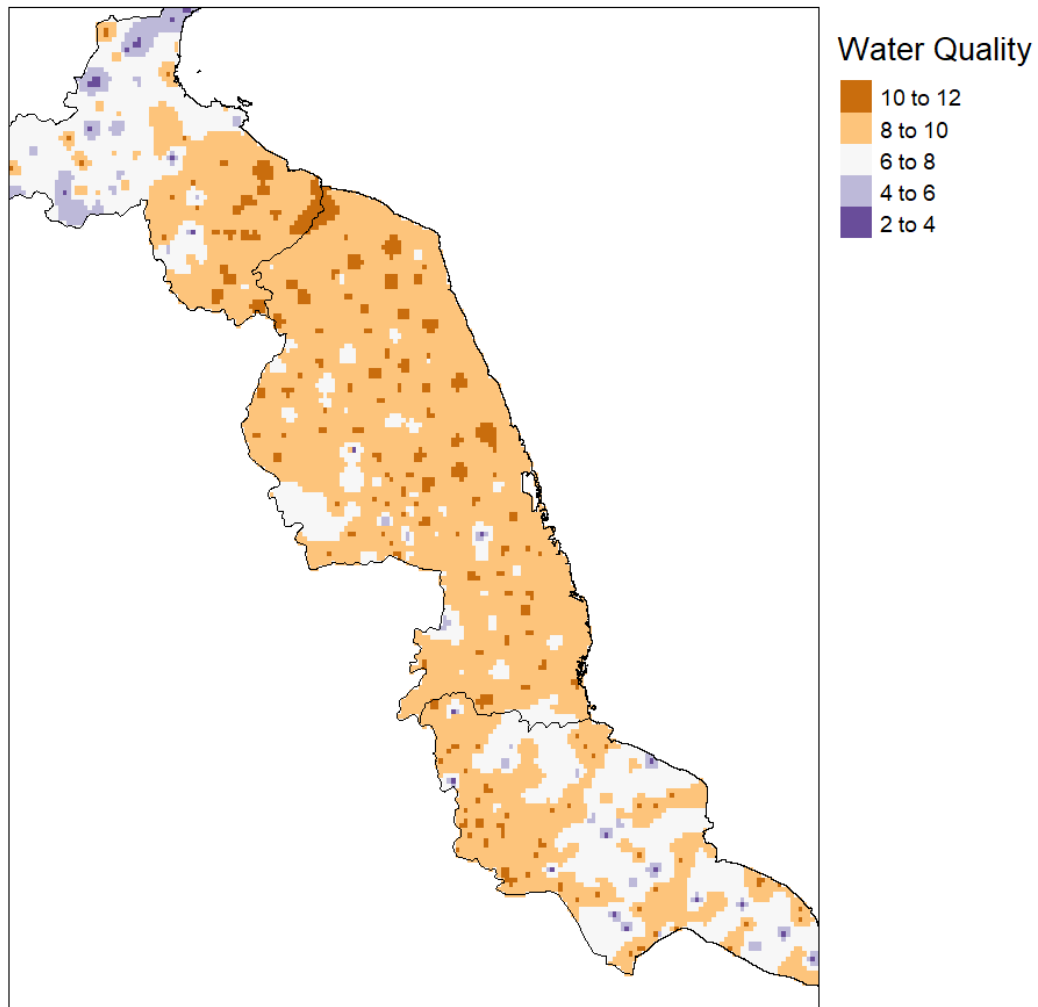


图 14 地下水质量综合评价空间分布结果

单项组分分类结果显示总硬度、溶解性总固体、氯化物、锰和亚硝酸盐的IV类、V类水占比总和较高，这 5 个指标分类结果的空间分布情况如图 15 所示。

研究区中部盐城地下水质量非常差，而亚硝酸盐和溶解性总固体在盐城地区也以 IV类、V类分布较多。高 TDS 与浅层地下水咸化有关，一方面古海水与海相沉积有关，另一方面与地下水开采导致的水位下降和海水入侵有关。亚硝酸盐属于氮类污染物，这类污染物大多来源于人类活动的影响。因此，研究区地下水质量总体较差可能与以下两点有关：1) 淡水咸化造成的高 TDS；2) 人类活动造成的过高浓度的氮素。

## 5. 结论

Piper 三线图的结果显示研究区主要地下水化学类型为重碳酸型水。结合苏林分类和 TDS 的特征可知研究区地下水以  $\text{NaHCO}_3$  型水、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水为主，且大都属于微咸水和咸水。

研究区地下水质量差，较好和好的地下水占比总和不超过 15%。一方面受淡水咸化造成的高 TDS 的影响，另一方面受人类活动造成的高浓度氮素影响。

研究区以微咸水和咸水为主，且较差和极差质量的地下水分布十分广泛，因此，研究区的浅层地下水不适用于生活用水，现存的民用井虽然还在投入使用，但是已经不能满足当地人民的生活需求了。这也印证了沿海地区一直以来主要以开采深层地下水作为工农业用水，而不考虑直接开采浅层地下水。

### 参考文献：

- [1] 康博. 江苏沿海地区地下水演化与合理开发利用研究[D]. 吉林大学, 2017.
- [2] 王艺伟. 苏北沿海地区区域地面沉降模拟研究[D]. 南京大学, 2016.
- [3] GB/T 14848-93, 中华人民共和国地下水质量标准[S].
- [4] 王雅茹, 施龙青, 邱梅. 基于 Piper 三线图的矿井水化学特征分析[J]. 山东煤炭科技, 2019(04): 145-147+150.
- [5] 刘海波, 王健, 王猛, 吴乐军, 周明高. 电缆取样地下水苏林分类法修正及应用[J]. 地下水, 2020, 42(05): 30-32.

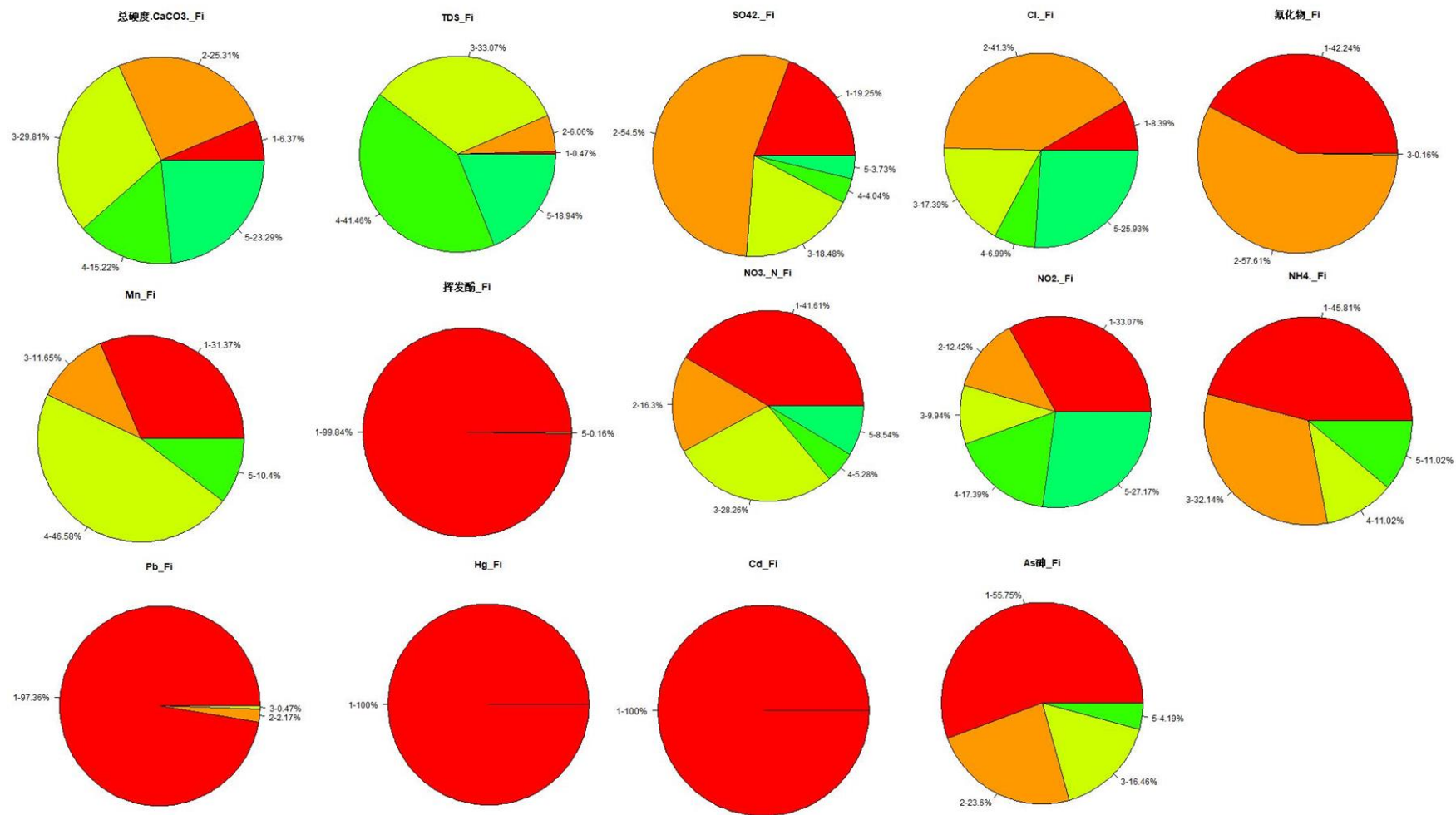


图 12 单项组分评价结果



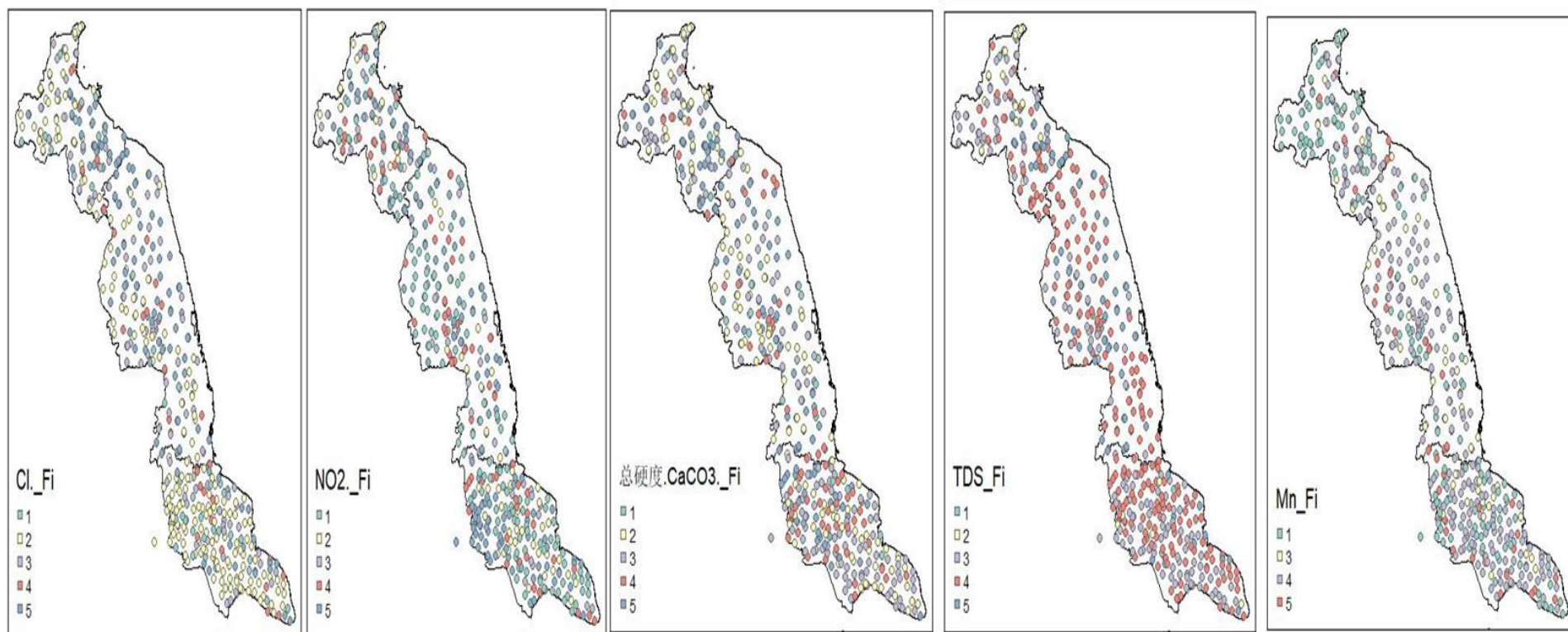


图 15 单项组分分类结果空间分布情况