

## 逐步聚类——方法简介

逐步聚类方法（stepwise cluster analysis, SCA）的基本原理是根据给定的标准，把一组样本分割成两类，或者把两组样本合并成一类，一步一步，直到将所有的样本进入相应的类之中。为了将含有  $n$  个样本的类分割成子类，根据 Wilks 似然率准则，如果分割点最佳，Wilks 值  $\Lambda$  ( $\Lambda = |W|/|T|$ ) 应该最小，其中  $T$  是总样本矩阵  $\{t\}$ ， $|T|$  是矩阵  $\{t\}$  的行列式， $W$  是组内矩阵  $\{w\}$ ， $|W|$  是矩阵  $\{w\}$  的行列式。当  $\Lambda$  值非常大时，则该类不能再分，必须被合并到上一级的类中。因此，分类和合并的标准由一系列根据 Wilks 准则进行的 F 检验构成。该方法能够有效的处理自变量和因变量之间复杂的非线性关系，以及处理连续及离散型随机变量。

$$R = \frac{1 - \Lambda^{1/s}}{\Lambda^{1/s}} * \frac{Z * S - P * (K - 1) / 2 + 1}{P * (K - 1)}$$

$$Z = n_h - 1 - (P + K) / 2$$

$$S = \frac{P^2 * (K - 1)^2 - 4}{P^2 + (K - 1)^2 - 5}$$

$$F(P, n_h - P - 1) = \frac{1 - \Lambda}{\Lambda} * \frac{n_h - P - 1}{P}$$

其中统计量  $R$  是近似的服从自由度  $v_1 = P * (K - 1)$  和  $v_2 = P * (K - 1) / 2 + 1$  的 F 分布。  $K$  是组的个数，  $P$  是因变量的个数。当  $P=1$  或  $2$ ， 或者  $K=2$  或  $3$  的时候，  $R$ -统计量就简化成一个精确的 F-统计量。

**案例 1：基于逐步聚类的珠三角城市群生态功能区划**

人类社会的生存和发展离不开生态环境的支持。生态服务功能及生态功能区划已成为当前城市生态系统研究的热点之一。生态功能区划着眼于生态系统的时空异质性，研究区域中由等级系统构成的空间镶嵌的生态单元结构格局，通过分区划片揭示出环境功能区在形成、演变、本底、容量（或承载力）、脆弱性和保护方向等方面的差异性<sup>[1]</sup>。本研究基于上述生态系统功能服务价值分析，打破原有的行政区域划分，对珠三角地区的 47 个区县进行生态功能评价与分区。

生态功能分区的目的是促进区域自然资源的合理开发与利用，避免生态破坏，提高生态环境对区域经济发展的支撑能力，促进区域的可持续发展<sup>[2]</sup>。按照生态系统的特征，结合各行政区域社会、经济的发展要求，明确生态功能区的边界和分区范围，可以有针对性地实施区划等级、明确监督管理重点<sup>[3]</sup>。此外，进行生态分区时，需要在时间尺度上考虑过去、现状以及未来的发展，以便制定具有科学性、战略性、前瞻性的分区方案<sup>[4]</sup>。因此，需要考虑珠三角地区生态功能的动态变化。生态功能分区是生态保护决策科学化（从经验到科学）、管理定量化（从定性到定量）、资源开发合理化、运作过程信息化的重大基础性工作，它将在参与政府管理，指导生态保护和规范生态建设中发挥重要作用<sup>[5]</sup>。

表 1 珠三角 47 区县生态服务功能价值总量（亿元）

	1980	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2020
荔湾区	0.06	0.29	0.76	1.09	0.94	1.38	1.27	1.50
越秀区	0.01	0.05	0.13	0.22	0.22	0.33	0.21	0.25
海珠区	0.08	0.40	1.17	1.73	1.58	2.30	4.37	5.16
天河区	0.10	0.52	1.41	2.31	2.25	3.28	2.36	2.78
白云区	0.51	2.73	7.66	12.24	11.61	16.94	29.08	33.93
黄埔区	0.45	2.22	6.02	9.51	8.85	12.47	19.27	22.46
番禺区	0.71	3.47	10.64	16.56	16.73	24.26	36.11	42.60
花都区	0.78	4.14	12.75	20.22	19.59	28.07	39.76	47.21
南沙区	0.87	4.43	14.28	23.79	22.67	32.82	55.75	65.38
从化区	1.76	8.71	23.62	39.86	39.79	58.05	85.25	100.53
增城区	1.49	7.36	20.19	33.59	33.77	49.38	66.64	78.26
罗湖区	0.07	0.32	0.87	1.45	1.45	2.08	4.11	4.49
福田区	0.07	0.34	0.27	0.40	0.40	0.55	1.02	1.19
南山区	0.07	0.44	1.14	1.50	1.50	2.15	3.04	3.59
宝安区	0.47	4.16	9.72	11.41	10.78	14.65	17.75	21.58
龙岗区	0.71	3.49	8.77	13.71	13.27	19.37	28.34	34.47
盐田区	0.07	0.32	0.80	1.29	1.29	1.85	2.85	2.99
香洲区	0.37	2.00	5.58	9.52	9.36	10.52	15.75	18.60
斗门区	0.51	2.23	7.02	19.30	19.14	27.67	43.59	49.31
金湾区	0.25	1.28	4.08	10.50	10.19	14.63	27.19	31.68
禅城区	0.37	1.82	5.02	6.21	5.91	7.10	2.46	2.91
南海区	1.79	8.99	26.74	41.13	38.64	55.21	42.95	50.74
顺德区	2.92	14.70	44.63	65.94	62.23	87.91	44.21	52.22
三水区	1.19	6.50	21.72	35.70	35.01	49.98	75.82	88.88
高明区	0.92	4.66	13.81	22.72	22.41	32.03	47.73	56.47
蓬江区	0.51	2.82	7.58	11.31	11.27	16.19	19.96	23.60
江海区	0.09	0.63	3.79	6.04	5.41	7.44	8.53	10.46
新会区	1.67	8.29	27.72	46.42	46.41	66.43	97.01	113.79
台山市	2.74	14.27	44.13	76.21	76.24	110.63	168.43	200.58
开平市	1.59	7.92	21.37	36.20	36.16	52.33	75.40	89.46
鹤山市	1.03	5.10	13.68	23.23	23.44	33.93	50.81	59.78
恩平市	1.65	8.14	22.38	37.83	37.71	54.04	77.94	91.84
端州区	0.29	1.48	4.07	6.54	6.23	9.06	8.58	12.35
鼎湖区	0.94	5.02	12.15	25.55	25.54	37.36	59.94	70.24
高要区	2.24	11.35	30.69	53.75	53.11	77.32	123.84	146.47
广宁县	2.60	12.88	34.73	58.60	58.63	85.60	116.96	138.47
怀集县	3.40	16.85	45.52	77.40	77.64	111.86	163.21	192.63
封开县	3.00	14.85	40.11	67.81	67.85	98.62	143.27	169.50
德庆县	2.13	10.55	28.49	48.07	48.19	70.31	96.48	114.69
四会市	1.16	6.38	19.86	35.26	34.93	50.74	80.41	94.74
惠城区	1.68	8.42	23.35	39.43	39.37	57.27	80.50	93.99
惠阳区	0.83	4.11	11.13	18.66	17.89	26.03	38.55	44.98
博罗县	2.65	13.13	35.61	59.74	59.44	86.49	125.08	147.60
惠东县	3.16	16.26	43.92	74.42	74.41	108.56	159.85	189.10
龙门县	2.21	10.96	29.88	50.42	50.56	73.15	107.27	126.35
东莞市	2.71	14.22	37.48	52.65	48.98	69.84	120.68	140.93
中山市	2.92	14.86	46.08	63.47	62.57	88.26	112.90	133.64

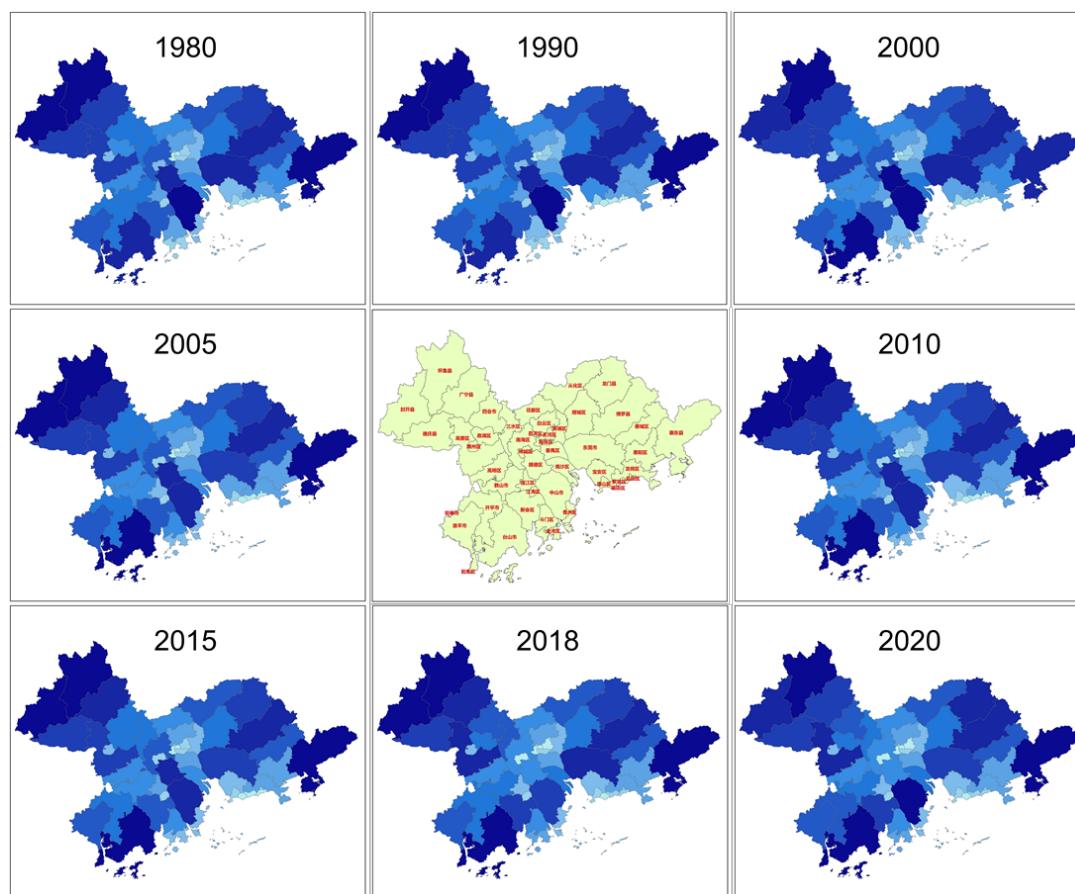


图 1 珠三角 47 区县生态服务功能价值总量空间分布图

首先，本研究核算出了历年珠三角地区47区县生态服务功能价值总量（如人类社会的生存和发展离不开生态环境的支持。生态服务功能及生态功能区划已成为当前城市生态系统研究的热点之一。生态功能区划着眼于生态系统的时空异质性，研究区域中由等级系统构成的空间镶嵌的生态单元结构格局，通过分区划片揭示出环境功能区在形成、演变、本底、容量（或承载力）、脆弱性和保护方向等方面的差异性<sup>[1]</sup>。本研究基于上述生态系统功能服务价值分析，打破原有的行政区域划分，对珠三角地区的47个区县进行生态功能评价与分区。

生态功能分区的目的是促进区域自然资源的合理开发与利用，避免生态破坏，提高生态环境对区域经济发展的支撑能力，促进区域的可持续发展<sup>[2]</sup>。按照生态系统的特征，结合各行政区域社会、经济的发展要求，明确生态功能区的边界和分区范围，可以有针对性地实施区划等级、明确监督管理重点<sup>[3]</sup>。此外，进行生态分区时，需要在时间尺度上考虑过去、现状以及未来的发展，以便制定具有科学性、战略性、前瞻性的分区方案<sup>[4]</sup>。因此，需要考虑珠三角地区生态功能的动态变化。生态功能分区是生态保护决策科学化（从经验到科学）、管理定量化（从定性到定量）、资源开发合理化、运作过程信息化的重大基础

性工作，它将在参与政府管理，指导生态保护和规范生态建设中发挥重要作用<sup>[5]</sup>。

表1、图1所示）。在图1中，颜色越深表示生态服务功能价值总量越高。可以看到，在所研究的8个年份中，江门市的台山县、肇庆市的怀集县、惠州市的惠东县以及肇庆市的封开县生态服务功能价值总量一直处于较高水平；在2020年，该三个地区的生态服务功能价值均超过150亿元，分别达到200.6、192.6、189.1及169.5亿元。然而，由结果可知，在珠三角地区一些经济发达的区县，其生态服务功能价值总量普遍较低。例如，广州市的荔湾区和越秀区、深圳市的福田区2020年的生态服务功能价值总量均不足2亿元。值得注意的是，同一个城市的不同区县，其生态服务功能价值总量也会存在较大差异。例如，江门市的蓬江区和江海区服务功能价值总量较小（2020年分别为23.6和10.5亿元），而同属于江门市的台山市服务功能价值总量在过去40年间一直维持在较高水平（2020年为200.6亿元，在所有区县中排名第一）。

表 2 珠三角 47 区县 11 类生态系统服务功能价值（以 2020 年为例，单位：亿元）

	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
荔湾区	0.013	0.003	0.090	0.012	0.029	0.066	1.217	0.011	0.001	0.031	0.023
越秀区	0.003	0.007	0.004	0.025	0.073	0.021	0.046	0.030	0.002	0.027	0.012
海珠区	0.044	0.039	0.278	0.133	0.388	0.272	3.527	0.157	0.013	0.199	0.112
天河区	0.082	0.063	-0.015	0.232	0.586	0.199	1.045	0.236	0.025	0.227	0.104
白云区	1.050	0.410	0.183	1.741	3.617	1.900	20.888	1.419	0.212	1.650	0.859
黄埔区	0.533	0.461	0.302	1.595	4.149	1.527	9.573	1.735	0.169	1.647	0.772
番禺区	0.890	0.191	1.398	0.986	1.704	1.986	32.821	0.606	0.130	1.150	0.738
花都区	1.567	0.805	-0.295	3.235	7.360	2.988	23.788	2.905	0.374	3.022	1.456
南沙区	1.756	0.256	1.412	1.624	2.109	2.950	51.678	0.672	0.237	1.609	1.075
从化区	2.898	2.651	-0.473	9.300	24.206	7.669	29.855	10.026	0.981	9.256	4.164
增城区	2.534	1.890	-1.012	7.023	17.555	5.768	26.779	7.073	0.763	6.797	3.091
罗湖区	0.057	0.084	0.155	0.273	0.794	0.303	1.993	0.331	0.026	0.320	0.152
福田区	0.015	0.035	0.018	0.116	0.348	0.101	0.217	0.142	0.011	0.129	0.057
南山区	0.086	0.111	0.072	0.332	0.906	0.278	0.865	0.416	0.034	0.340	0.152
宝安区	0.338	0.354	0.838	1.107	3.029	1.331	11.221	1.338	0.113	1.279	0.632
龙岗区	0.636	0.892	0.679	2.873	8.089	2.616	10.418	3.448	0.284	3.123	1.416
盐田区	0.041	0.090	0.046	0.293	0.871	0.253	0.543	0.357	0.028	0.323	0.142
香洲区	0.286	0.399	0.490	1.313	3.749	1.323	7.202	1.561	0.128	1.470	0.681
斗门区	1.298	0.454	1.096	1.849	3.620	2.521	33.808	1.511	0.233	1.867	1.052
金湾区	0.492	0.333	1.471	1.047	2.629	1.682	20.666	1.211	0.114	1.310	0.722
禅城区	0.083	0.013	0.049	0.081	0.111	0.134	2.268	0.035	0.012	0.076	0.049
南海区	1.639	0.392	0.746	1.772	2.660	2.408	37.243	1.141	0.249	1.553	0.938
顺德区	1.580	0.231	0.698	1.505	1.944	2.389	40.769	0.603	0.220	1.387	0.899
三水区	1.770	0.570	3.235	2.350	4.588	4.334	64.972	1.929	0.293	3.009	1.833
高明区	1.418	1.176	0.245	4.293	11.139	3.951	22.925	4.469	0.454	4.373	2.028
蓬江区	0.504	0.238	0.692	0.905	2.051	1.262	15.461	0.848	0.105	0.991	0.539
江海区	0.212	0.041	0.371	0.215	0.347	0.477	8.211	0.123	0.029	0.259	0.173
新会区	2.652	1.271	2.336	5.097	11.707	6.360	70.987	4.608	0.586	5.366	2.816
台山市	4.953	3.653	2.462	13.182	33.166	13.091	94.729	13.674	1.425	13.682	6.566
开平市	2.576	2.077	0.902	6.872	17.163	6.124	35.472	7.600	0.750	6.776	3.152
鹤山市	1.591	1.334	0.520	4.574	11.693	4.146	23.731	4.972	0.490	4.594	2.131
恩平市	2.356	2.387	1.825	7.322	19.098	6.510	31.804	8.790	0.776	7.509	3.461
端州区	0.172	0.171	0.436	0.593	1.647	0.754	6.789	0.667	0.059	0.706	0.353
鼎湖区	0.876	0.662	3.101	2.336	6.341	3.838	45.593	2.561	0.237	3.043	1.649
高要区	3.263	2.924	2.072	10.257	27.032	9.989	62.909	11.122	1.071	10.772	5.056
广宁县	2.542	4.089	1.189	13.603	39.040	11.505	28.191	16.068	1.321	14.529	6.393
怀集县	4.242	5.403	0.380	18.567	51.613	15.579	46.016	21.054	1.854	19.354	8.571
封开县	3.273	4.230	1.967	14.443	40.388	13.001	51.633	16.546	1.431	15.554	7.031
德庆县	2.191	3.206	1.006	10.780	30.604	9.268	27.454	12.569	1.057	11.469	5.083
四会市	1.974	1.519	2.433	5.203	13.287	5.827	49.867	5.653	0.557	5.636	2.784
惠城区	2.289	1.542	1.350	5.667	14.027	5.903	48.105	5.733	0.620	5.882	2.872
惠阳区	1.639	1.268	-0.296	4.222	10.298	3.303	13.748	4.585	0.470	3.955	1.788
博罗县	4.741	3.589	-1.073	12.873	32.055	10.681	52.015	13.308	1.405	12.370	5.635
惠东县	4.336	5.173	1.039	17.478	47.916	14.847	50.284	19.947	1.767	18.183	8.126
龙门县	2.839	3.433	-0.015	12.028	33.261	10.129	32.049	13.396	1.206	12.482	5.539
东莞市	2.102	1.456	6.046	4.925	12.703	7.667	90.601	5.455	0.522	6.132	3.320
中山市	2.990	1.018	3.526	4.476	9.270	6.805	93.838	3.534	0.545	4.864	2.778

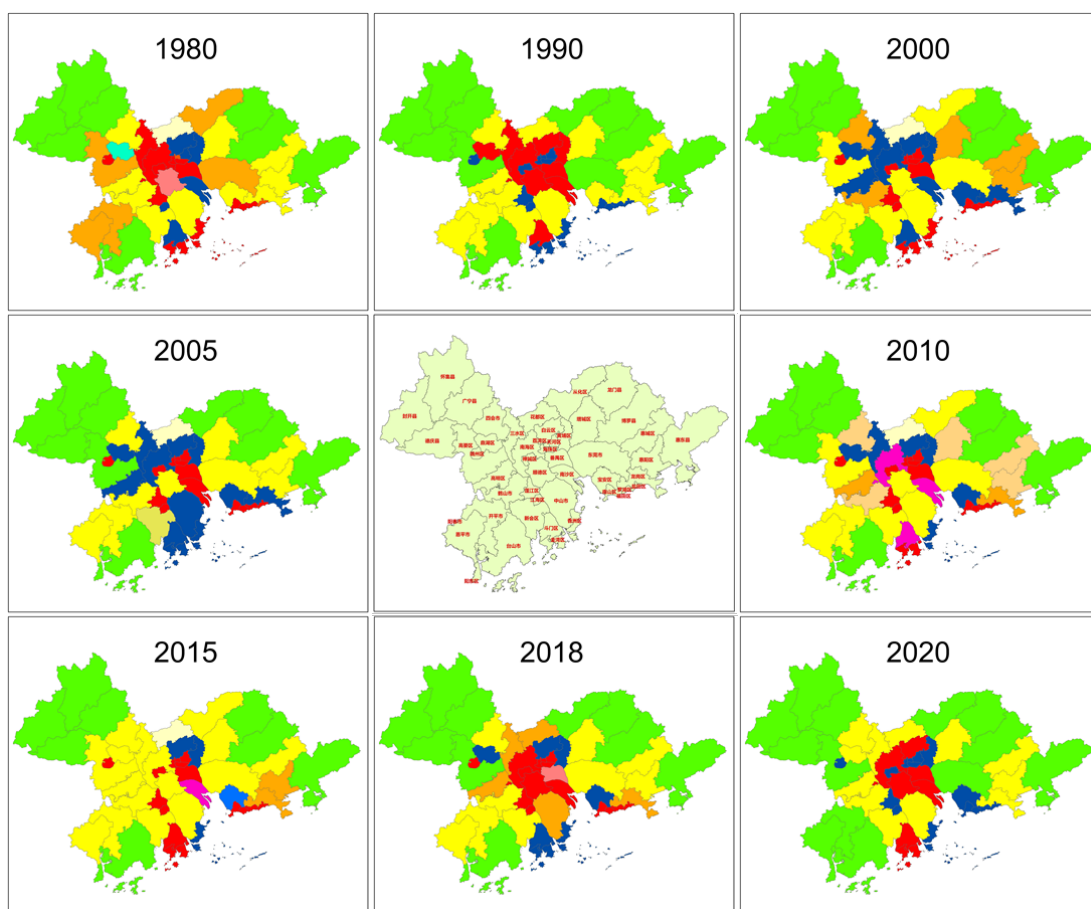


图 2 珠三角 47 区县生态功能区划图

除上述展示的生态服务功能价值总量外，本研究还得到了11类生态系统服务功能（即食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、维持养分循环、生物多样性、美学景观）的细化结果（见表2）。在表中的每一列，颜色越蓝表示生态服务功能越高，颜色越红表示生态服务功能越低。在此细化结果的基础上，通过逐步聚类方法，将47个区县的相似空间归类，从而达到生态功能区划的目的。由生态功能区划图（图2）可知，生态系统的分区是随时间演变的，有些年份之间差别较大。就生态功能区划的类别而言，1980年有9类区，1990年有4类，2000年有6类，2005年有7类，2010年有8类，2015年有8类，2018年有6类，2020年有4类。分类较少说明各个区县之间各类生态服务功能的一致性程度较高，而分类较多说明各区县之间各类生态服务功能的差异性较大。

由图2可以看出，各年份间的整体分类情况具有相对较高的一致性。总体而言，肇庆

市的大部分区县（如封开县、怀集县、德庆县、广宁县）、惠州市的大部分区县（如博罗县、惠城区、惠东县）以及江门市的台山市始终处于同一类别。由表2可知，这些区县各类单项生态服务价值都非常高。例如，就“气候调节”这一项生态服务功能而言，除惠城区（14.0亿元）之外，其余几个区县在2020年的价值均在30亿元以上。江门市的开平市和恩平市的各类单项生态服务价值均处于较高水平，二者在各年份始终处于同一生态类别。

除此之外，深圳市的罗湖区、福田区和南山区在40年间始终处于同一类别，这三个区县各类型生态服务价值都处于较低水平（2020年，除“水文调节”功能外，其余各类服务价值均小于1亿元）。除1980年外，1990-2020年间，广州市的荔湾区、越秀区、海珠区和天河区始终处于同一类别；江门市的蓬江区和江海区也始终处于同一类别。相对而言，珠三角中心区域年际间的分类变化较大。以佛山市的三水区 and 南海区为例，在1990-2005年间，其始终为同一生态分区类型；然而自2010年开始，二者分属于两种不同的生态分区。

由部分研究可知，生态系统的结构和组成单元都是其自身发生、演化的产物，因此要用历史和动态的观点看待分区。该研究为珠三角城市群生态功能分区提供了重要依据，其评价结果为生态系统的科学管理、确定生态保护关键区、制定生态保护和建设政策提供了科学支持。



## 案例 2：基于逐步聚类降尺度方法的珠三角未来体感温度预估

本研究构建基于 SCA 的降尺度降尺度模型，通过集合预报预估珠三角地区的未来的体感温度。评估了多个排放情景下，体感温度的变化趋势。基于预估的体感温度气候情景，分析极端气候事件的变化趋势。SCA 是一种分类方法。它本质是不断地根据 Wilks 准则进行的 F 检验对样本集进行分割与合并直到样本集再也无法被分割与合并。SCA 的表现依赖于历史观测资料，因此在有足够多的历史研究资料的区域，SCA 可以高效的通过训练历史样本建立聚类树，并且准确的进行区域预报量的预估。使用 SCA 进行统计降尺度的一般步骤如下：（1）预报因子和预报量的匹配；（2）对样本进行分割与合并直到无法进行重复的操作；（3）根据分类的路径建立聚类树；（4）根据输入的未来的大尺度预报因子以及之前建立的聚类树即统计关系，对未来的预报量进行预估。

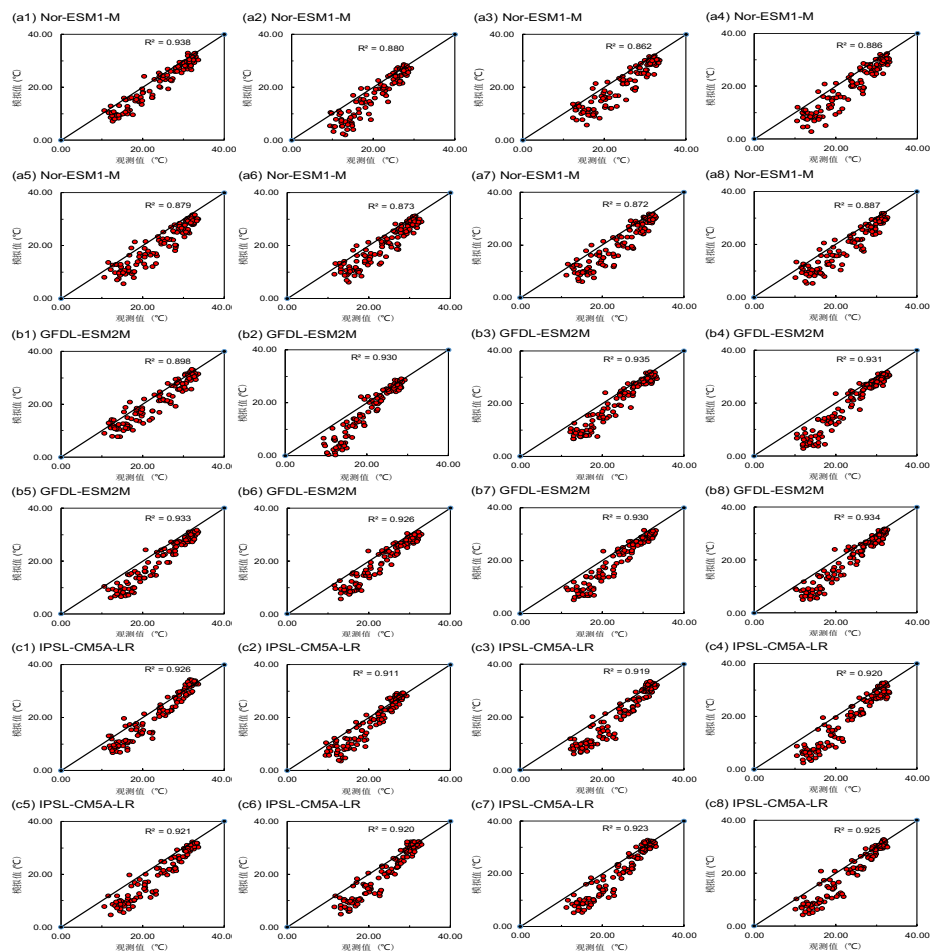


图 3 逐步聚类降尺度模型月平均值验证结果



图 3 展示了使用逐步聚类降尺度模型时，3 套 GCM 在珠三角地区 8 个站点的平均态验证情况。从图 3 中可以看出，所有验证结果的  $R^2$  都在 0.86 以上。从不同气候模式的角度看，GFDL-ESM2M 模式的降尺度结果最好，平均  $R^2$  为 0.93。IPSL-CM5A-LR 模式的降尺度结果次之，平均  $R^2$  为 0.92。最差的是 Nor-ESM1M 模式平均  $R^2$  为 0.88。从不同站点的角度来看，不同的 GCM 模式会对结果产生明显的影响，其中肇庆和中山的模拟结果最好，平均  $R^2$  均达到了 0.92。东莞的模拟结果最差，平均  $R^2$  为 0.90。总的来说，逐步聚类降尺度模型的降尺度结果模拟出了实际观测值的特征，在平均值上也比较吻合。主要的偏差出现在低温区，原因主要是本身 GCM 模式在低温区的模拟和实际观测值就有明显的偏差，显然偏差有一部分被继续转移到了降尺度结果中。

图 4 展示了使用逐步聚类降尺度模型时，3 套 GCM 在珠三角地区 8 个站点每个月的极端值验证情况。从图 8(a)中可以看出，Nor-ESM1M 模式降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.71-0.85，IPSL-CM5A-LR 模式降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.85-0.93，GFDL-ESM2M 模式降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.78-0.87。不同 GCM 模式的变动区间明显不同。从站点的角度看，肇庆的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.78-0.87。广州的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.76-0.89。东莞的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.71-0.85。惠州的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.76-0.87。中山的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.78-0.89。珠海的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.79-0.93。深圳的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.78-0.92。江门的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.75-0.87。从图 5 中可以看出，Nor-ESM1M 模式降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.73-0.89，IPSL-CM5A-LR 模式降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.81-0.87，GFDL-ESM2M 模式降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.79-0.85。从站点的角度看，肇庆的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.81-0.89。广州的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.73-0.85。东莞的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.79-0.87。惠州的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.80-0.88。中山的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.80-0.88。珠海的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.77-0.85。深圳的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.79-0.87。江门的降尺度结果的  $R^2$  范围是 0.77-0.88。炎热值和寒冷值的验证结果与平均态验证相比更差一些且决定系数变动范围更大，说明了极端值的模拟中存在更多的不确定性。炎热值和寒冷值的模拟效果接近，炎热值的模拟结果略好一些。极端值的验证结果也体现出了分类方法的特征，过多的样本分到同一类时会造成明显的偏差。

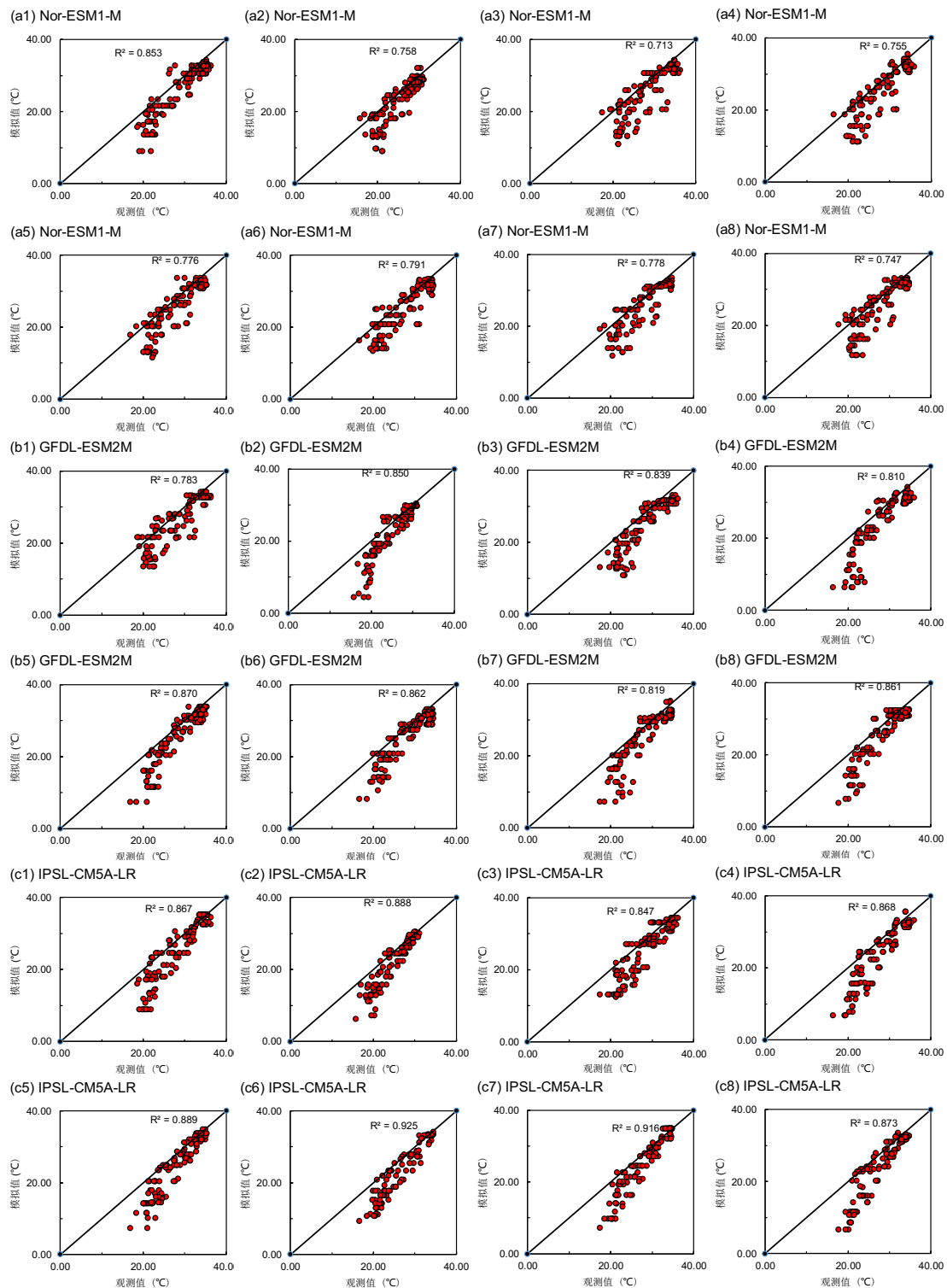


图 4 逐步聚类降尺度模型极端炎热值验证结果

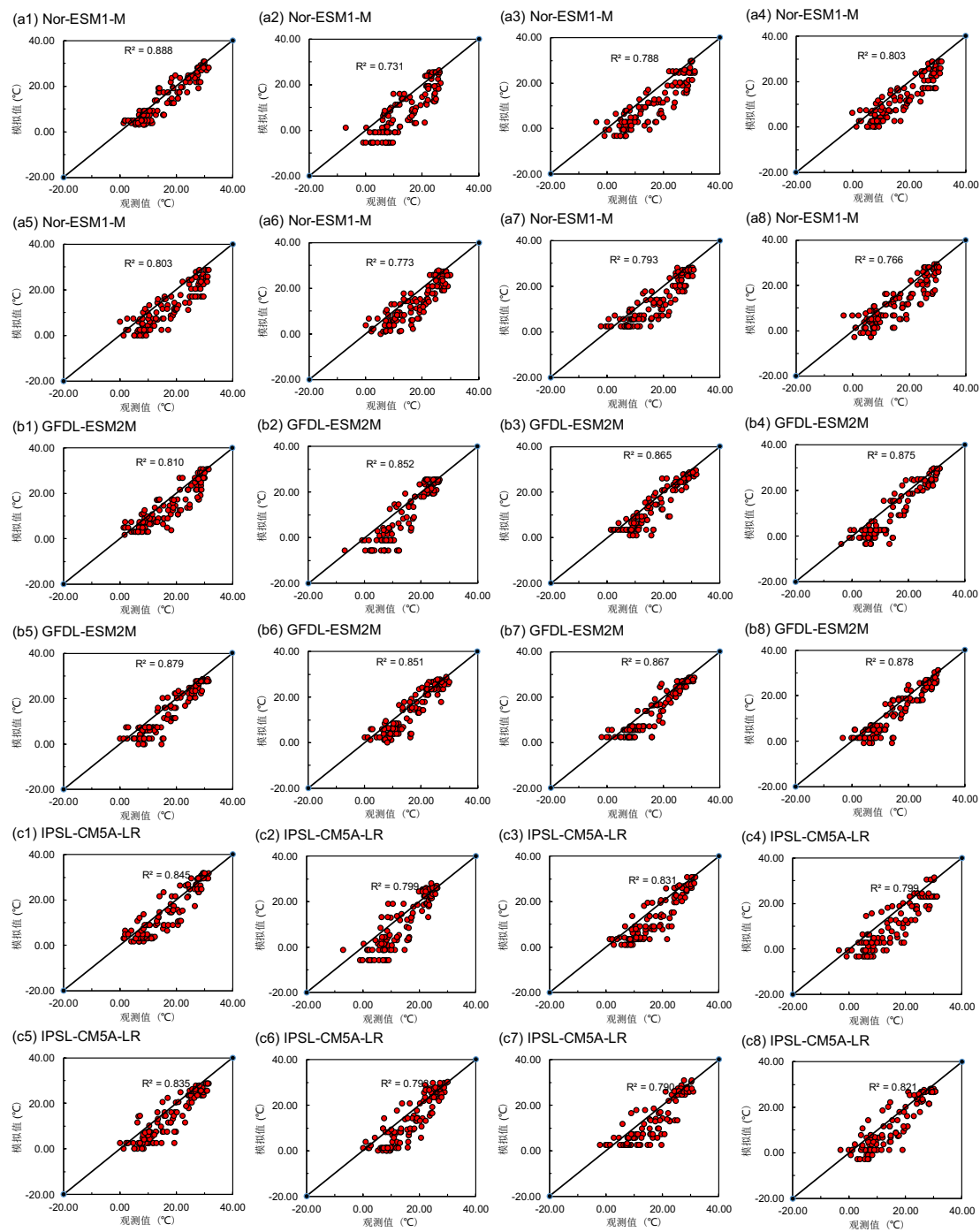


图 5 逐步聚类降尺度模型极端寒冷值验证结果

### 案例 3：基于逐步聚类的珠三角干旱预测模型开发

首先，通过多个全球气候模式（GCMs）驱动的逐步聚类干旱预测模型（SCP），在两个不同排放情景下（RCPs）对珠三角地区干旱状况进行预测评估。随后，基于多个气象站逐日最高气温观测数据，4 个 GCMs 和 NCEP 再分析数据，提出一种基于逐步聚类分析（SCA）的未来热浪预测（SCHW）模型，进而对珠三角未来热浪变化进行分析。逐步聚类（SCA）是一种基于多元方差分析的理论，具有自变量与因变量之间无函数化假设以及可以同时考虑多个因变量的优点。该方法依据 Wilks' lambda statistic 判别标准，通过两组 d 维因变量 e 和 f 建立 GCMs 与站点观测数据之间的统计关系：

$$\text{组内方差和: } E = \sum_{i=1}^{n_e} (e_i - \bar{e})(e_i - \bar{e}) + \sum_{j=1}^{n_f} (f_j - \bar{f})(f_j - \bar{f})$$

$$\text{组间方差和: } H = \frac{n_e n_f}{n_e + n_f} (\bar{e} - \bar{f})(\bar{e} - \bar{f})$$

$$\text{Wilks' 统计量: } \Lambda = \frac{|E|}{|E + H|}$$

具体地，对于珠三角地区的未来干旱变化的定量分析，主要是将 5 套 GCMs（即 CSIRO-Mk3.6.0, CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MIROC5 和 MRI-CGCM3）在两个 RCP（即 RCP4.5 和 RCP8.5）下的输出数据进行统计降尺度。并通过两个气象干旱指数（即 SPEI 和 SPI）定量分析未来时期珠三角地区干旱状况的时空变异特征。同时，考虑到干旱预测过程中全球气候模式以及不同排放情景之间的不确定性，本研究通过析因分析方法（Multi-factorial analysis）对干旱预测过程中不确定性的主要来源展开追踪。

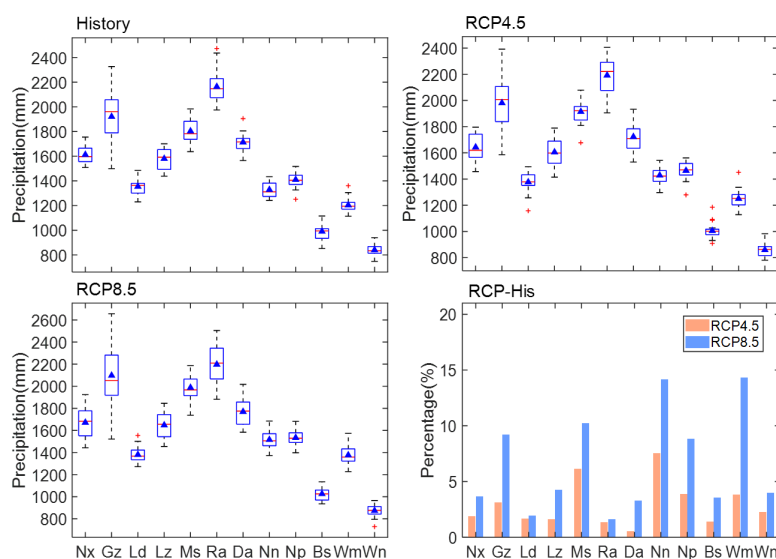


图 6 RCP4.5 和 RCP8.5 下预测得到的年降水及其变化

本研究采用多套 GCMs 的集合平均结果来预测评估未来时期研究区气候要素的变化。图 6 RCP4.5 和 RCP8.5 下预测得到的年降水及其变化显示了 RCP4.5/8.5 下预测得到的年降水的变化，结果表明年降水量在未来时期将增加。其中，在 RCP4.5 情景下，研究区所有气象站点年降水量预测值相比基准期的增加幅度为 0.53~7.77%，而在 RCP8.5 情景下，年降水量的增加幅度为 1.60~14.15%。

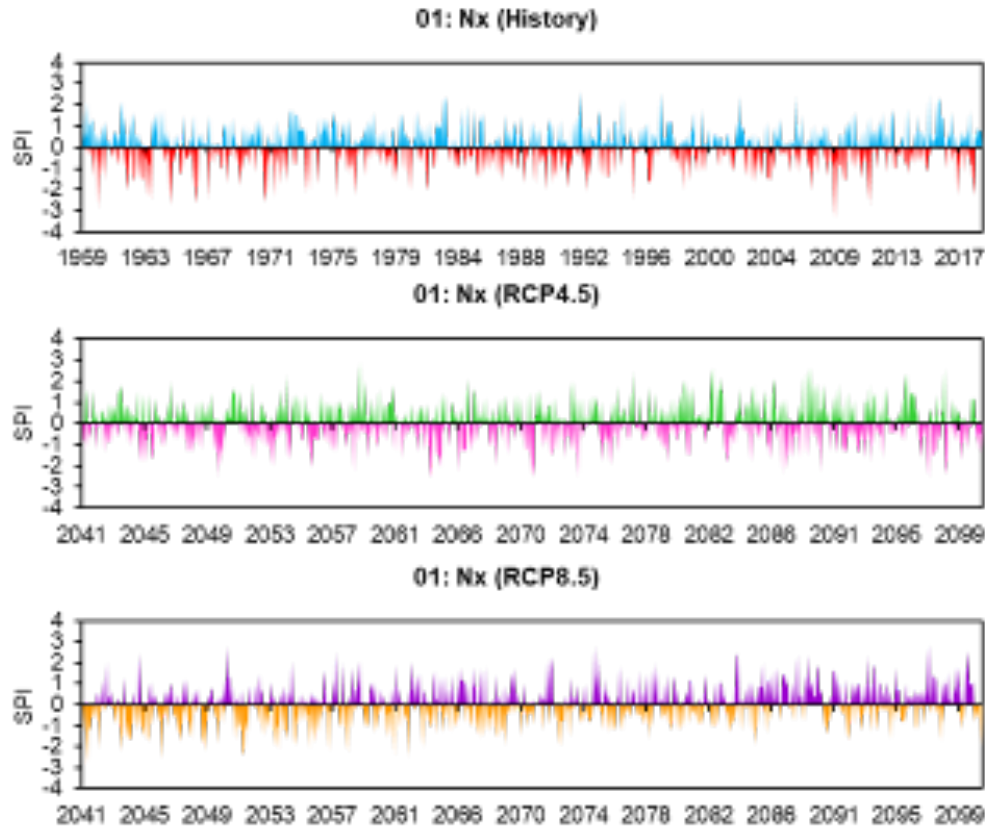


图 7 SPI 不同时期的月时间序列

本研究运用 SCA 研究方法，对珠江流域降水进行了统计降尺度。选定珠江流域 12 个气象站点，分析两种排放情景下 2080s（2075-2094 年）相对历史时期（1981-2000 年）降水的百分比变化，同时利用降尺度后集合平均的降水结果计算得到了未来 60 年（2041-2100 年）气象干旱指标 SPI 数值（详见图 7）。以南雄站点为例，分析 SPI 在历史(1959-2018)、RCP4.5(2041-2100)和 RCP8.5(2041-2100)三个时间段的月时间序列。与历史时期相比，尤其到本世纪末，极端干旱有所减少。

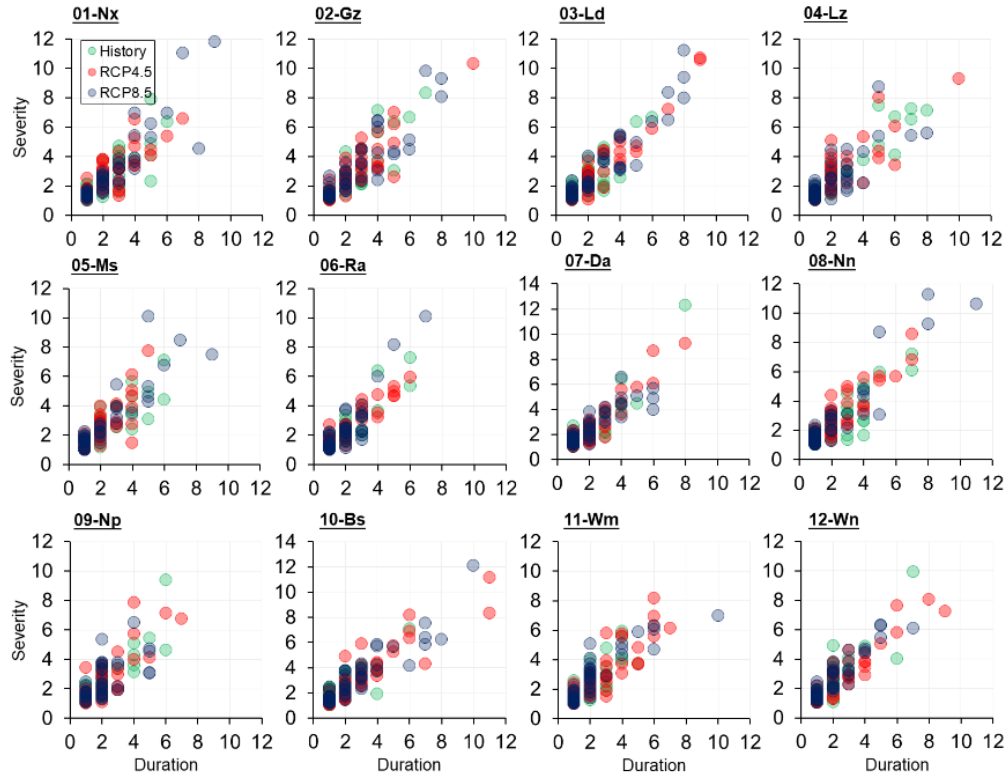


图 8 未来时期干旱状况的变化

干旱作为影响最广泛的自然灾害，其特征变化与温度和降水等息息相关，因而在此基础上，本研究进一步分析了珠三角地区未来时期干旱状况的变化。图 8 展示了珠三角地区站点尺度干旱状况在历史及未来阶段的变化。与历史时期相比，在 RCP4.5 下，持续时间为 1 至 2 个月的干旱事件将减少 7.7%；持续时间为 3 到 4 个月的干旱事件将增加 4.3%；持续时间为 5 个月及以上的干旱事件将增加 3.4%。在 RCP8.5 下，这一增加比例分别为 6.1%、1.4%和 4.7%。这一结果意味着珠三角地区未来时期将会出现更多的更高严重程度中长期干旱事件。由于全球气候模式及排放情景的不确定性，在干旱预测过程中追踪其不确定性的来源对提升干旱状况的预测能力具有重要意义。