

An Effective Biomonitor of Potentially Toxic Elements in Marine Ecosystems: the Brown Alga *Dictyota spiralis*

Maria Antonietta Nitopi ¹, Daniela Baldantoni ^{1,*}, Vincenzo Baldi ¹, Floriana Di Stefano ² and Alessandro Bellino ¹

¹ Dipartimento di Chimica e Biologia "Adolfo Zambelli", Università degli Studi di Salerno,
Via Giovanni Paolo II, 132-84084 Fisciano (SA), Italy; mnitopi@unisa.it (M.A.N.); vbaldi@unisa.it (V.B.);
abellino@unisa.it (A.B.)

² Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare, Piazzale Flaminio, 9-00196 Roma, Italy;
floriana.distefano@gmail.com

* Correspondence: dbaldantoni@unisa.it; Tel.: +39-089-969542

Table S1. Macronutrient concentrations (mean values \pm standard deviations), expressed on a dry weight basis, in the analyzed macrophytes collected from the different sites of the study area (AH: Agropoli Harbor, TB: Trentova Bay, CT: Cape Tresino, CP: Cape Pagliarolo, SM: San Marco, OM: Ogliastro Marina).

Site	Species	Ca (mg/g)	K (mg/g)	Mg (mg/g)	P (mg/g)	S (mg/g)
AH	<i>C. elongata</i>	24.40 \pm 0.40	6.64 \pm 0.04	5.52 \pm 0.13	0.23 \pm 0.01	2.45 \pm 0.04
AH	<i>D. spiralis</i>	9.61 \pm 0.96	24.08 \pm 0.19	5.01 \pm 0.38	0.74 \pm 0.01	10.93 \pm 0.07
AH	<i>P. oceanica</i>	3.10 \pm 0.73	25.23 \pm 0.85	2.60 \pm 0.19	0.83 \pm 0.01	3.31 \pm 0.04
AH	<i>U. compressa</i>	2.85 \pm 0.53	24.61 \pm 0.66	4.47 \pm 0.27	0.17 \pm 0.06	11.06 \pm 0.11
TB	<i>C. elongata</i>	27.70 \pm 1.94	2.53 \pm 0.06	8.38 \pm 1.47	0.11 \pm 0.01	2.39 \pm 0.08
TB	<i>D. spiralis</i>	8.20 \pm 1.21	25.13 \pm 0.18	3.07 \pm 0.15	0.34 \pm 0.01	6.77 \pm 0.14
TB	<i>H. virgatum</i>	7.85 \pm 1.08	17.30 \pm 0.41	4.04 \pm 0.30	0.24 \pm 0.03	4.22 \pm 0.61
TB	<i>J. rubens</i>	31.17 \pm 2.4	5.64 \pm 0.14	7.96 \pm 0.05	0.27 \pm 0.01	3.41 \pm 0.08
TB	<i>P. oceanica</i>	6.07 \pm 1.26	22.55 \pm 0.30	2.24 \pm 0.03	0.92 \pm 0.01	2.32 \pm 0.05
TB	<i>U. clathrata</i>	0.74 \pm 1.28	24.92 \pm 0.58	6.75 \pm 0.71	0.17 \pm 0.01	8.06 \pm 0.21
CT	<i>C. aerea</i>	9.91 \pm 2.13	23.30 \pm 0.37	2.70 \pm 0.05	0.20 \pm 0.01	11.73 \pm 0.37
CT	<i>C. elongata</i>	40.92 \pm 5.14	0.78 \pm 0.04	10.04 \pm 0.33	0.10 \pm 0.01	2.09 \pm 0.06
CT	<i>C. compressa</i>	7.33 \pm 1.70	24.13 \pm 1.20	8.35 \pm 1.09	0.24 \pm 0.01	10.82 \pm 0.11
CT	<i>C. crinita</i>	10.62 \pm 2.39	25.60 \pm 0.54	5.67 \pm 0.17	0.30 \pm 0.02	8.01 \pm 0.07
CT	<i>D. spiralis</i>	3.69 \pm 0.84	20.14 \pm 0.97	2.54 \pm 0.36	0.14 \pm 0.01	5.87 \pm 0.07
CT	<i>L. microcladia</i>	9.33 \pm 3.74	24.09 \pm 0.75	7.31 \pm 0.24	0.19 \pm 0.01	19.69 \pm 0.46
CT	<i>L. obtusa</i>	14.74 \pm 1.20	22.08 \pm 0.40	4.20 \pm 0.19	0.12 \pm 0.01	11.15 \pm 0.49
CT	<i>P. oceanica</i>	2.31 \pm 0.25	25.26 \pm 0.46	1.92 \pm 0.04	0.58 \pm 0.01	3.73 \pm 0.03
CP	<i>C. elongata</i>	5.87 \pm 0.85	7.14 \pm 0.25	4.19 \pm 0.11	0.11 \pm 0.01	2.59 \pm 0.02
CP	<i>C. balearica</i>	19.55 \pm 0.22	24.60 \pm 0.77	2.82 \pm 0.06	0.22 \pm 0.01	7.50 \pm 0.01
CP	<i>C. compressa</i>	7.13 \pm 0.98	23.46 \pm 1.02	14.86 \pm 0.92	0.28 \pm 0.01	21.07 \pm 0.56
CP	<i>D. spiralis</i>	1.60 \pm 0.72	19.16 \pm 0.38	9.95 \pm 0.10	0.16 \pm 0.01	10.19 \pm 0.18
CP	<i>J. rubens</i>	32.19 \pm 8.09	8.17 \pm 0.15	8.07 \pm 0.50	0.60 \pm 0.60	3.76 \pm 0.40
CP	<i>L. microcladia</i>	5.79 \pm 0.08	12.68 \pm 0.14	2.83 \pm 0.06	0.07 \pm 0.01	12.36 \pm 0.41
CP	<i>P. oceanica</i>	7.94 \pm 0.23	24.17 \pm 1.24	3.91 \pm 0.04	0.71 \pm 0.01	3.08 \pm 0.04
CP	<i>S. filamentosa</i>	12.28 \pm 0.99	9.99 \pm 0.02	15.38 \pm 0.4	0.21 \pm 0.01	8.49 \pm 0.28
SM	<i>C. coelothrix</i>	12.42 \pm 2.97	23.33 \pm 0.14	3.07 \pm 0.24	0.18 \pm 0.02	9.66 \pm 1.01
SM	<i>C. compressa</i>	3.39 \pm 0.53	23.94 \pm 0.71	5.01 \pm 0.12	0.20 \pm 0.01	12.59 \pm 0.08
SM	<i>D. spiralis</i>	5.25 \pm 0.39	23.59 \pm 1.29	1.96 \pm 0.01	0.12 \pm 0.01	7.19 \pm 0.10
SM	<i>J. rubens</i>	33.32 \pm 4.06	7.16 \pm 0.17	2.96 \pm 0.30	0.25 \pm 0.01	3.72 \pm 0.13
SM	<i>L. microcladia</i>	10.11 \pm 1.56	23.19 \pm 0.93	6.05 \pm 0.19	0.34 \pm 0.01	27.3 \pm 0.40
SM	<i>P. oceanica</i>	3.27 \pm 0.52	25.59 \pm 0.39	2.36 \pm 0.53	0.59 \pm 0.01	2.87 \pm 0.03
SM	<i>T. atomaria</i>	2.98 \pm 0.47	24.61 \pm 0.98	4.21 \pm 0.26	0.24 \pm 0.01	9.87 \pm 0.11
OM	<i>C. spinosa</i>	11.18 \pm 0.31	24.59 \pm 0.13	5.97 \pm 0.42	0.30 \pm 0.02	8.81 \pm 0.14
OM	<i>J. rubens</i>	15.05 \pm 0.44	13.59 \pm 0.40	4.62 \pm 0.46	0.19 \pm 0.01	3.07 \pm 0.01
OM	<i>L. microcladia</i>	10.41 \pm 0.59	21.94 \pm 0.42	3.14 \pm 0.22	0.48 \pm 0.02	25.96 \pm 0.28
OM	<i>P. oceanica</i>	7.45 \pm 0.11	24.70 \pm 0.32	5.31 \pm 0.06	0.56 \pm 0.01	3.42 \pm 0.03

Table S2. Micronutrient concentrations (mean values \pm standard deviations), expressed on a dry weight basis, in the analyzed macrophytes collected from the different sites of the study area (AH: Agropoli Harbor, TB: Trentova Bay, CT: Cape Tresino, CP: Cape Pagliarolo, SM: San Marco, OM: Ogliastro Marina).

Site	Species	Cr ($\mu\text{g/g}$)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Fe ($\mu\text{g/g}$)	Mn ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	V ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)
AH	<i>C. elongata</i>	< 0.01	5.67 \pm 0.53	22.93 \pm 4.09	13.40 \pm 1.57	1.08 \pm 0.09	3.73 \pm 0.46	25.28 \pm 6.58
AH	<i>D. spiralis</i>	9.85 \pm 1.09	24.73 \pm 0.23	806.24 \pm 18.09	104.38 \pm 0.70	8.42 \pm 0.49	3.59 \pm 0.16	37.69 \pm 0.96
AH	<i>P. oceanica</i>	1.28 \pm 0.32	126.29 \pm 1.18	350.26 \pm 21.51	154.80 \pm 0.43	28.30 \pm 0.19	1.94 \pm 0.10	103.35 \pm 1.55
AH	<i>U. compressa</i>	12.20 \pm 1.27	10.77 \pm 0.7	471.35 \pm 12.32	8.32 \pm 1.50	2.37 \pm 0.60	3.27 \pm 0.37	3.16 \pm 0.34
TB	<i>C. elongata</i>	< 0.01	3.05 \pm 2.66	16.71 \pm 4.56	47.32 \pm 7.63	2.93 \pm 0.59	1.66 \pm 0.27	5.92 \pm 0.16
TB	<i>D. spiralis</i>	4.27 \pm 0.62	6.58 \pm 0.51	419.69 \pm 48.81	11.20 \pm 0.52	1.66 \pm 0.13	1.95 \pm 0.11	10.47 \pm 0.27
TB	<i>H. virgatum</i>	2.64 \pm 0.41	5.83 \pm 0.58	240.29 \pm 15.58	41.56 \pm 1.52	2.66 \pm 0.27	4.33 \pm 0.14	< 0.40
TB	<i>J. rubens</i>	< 0.01	3.66 \pm 0.3	35.15 \pm 8.73	35.84 \pm 5.08	2.59 \pm 0.37	1.16 \pm 0.34	16.55 \pm 1.44
TB	<i>P. oceanica</i>	0.03 \pm 0.06	59.53 \pm 0.74	135.47 \pm 7.77	197.99 \pm 2.72	46.07 \pm 0.81	0.84 \pm 0.08	59.39 \pm 4.27
TB	<i>U. clathrata</i>	38.37 \pm 8.89	10.27 \pm 0.39	1641.02 \pm 615.96	30.34 \pm 3.61	6.77 \pm 0.49	10.14 \pm 0.61	1.68 \pm 2.92
CT	<i>C. aerea</i>	11.27 \pm 1.81	6.00 \pm 0.35	520.90 \pm 53.02	11.62 \pm 0.11	5.20 \pm 0.21	3.73 \pm 0.09	3.29 \pm 0.28
CT	<i>C. elongata</i>	4.82 \pm 8.34	3.73 \pm 0.27	30.22 \pm 37.22	36.87 \pm 1.78	1.28 \pm 0.10	1.56 \pm 0.09	7.03 \pm 0.69
CT	<i>C. compressa</i>	3.02 \pm 1.78	5.53 \pm 0.56	66.20 \pm 0.05	6.80 \pm 0.08	3.80 \pm 0.70	2.94 \pm 0.31	12.41 \pm 0.66
CT	<i>C. crinita</i>	0.48 \pm 0.10	7.06 \pm 0.2	161.39 \pm 22.50	19.12 \pm 0.62	3.03 \pm 0.09	21.69 \pm 0.49	8.61 \pm 0.14
CT	<i>D. spiralis</i>	4.91 \pm 0.70	6.02 \pm 0.65	537.92 \pm 42.41	16.12 \pm 2.24	3.76 \pm 0.17	2.62 \pm 0.14	< 0.40
CT	<i>L. microcladia</i>	1.07 \pm 0.36	7.76 \pm 0.34	92.81 \pm 3.18	14.06 \pm 2.25	3.01 \pm 0.02	6.27 \pm 0.74	9.75 \pm 0.67
CT	<i>L. obtusa</i>	3.68 \pm 0.34	13.84 \pm 3.27	166.01 \pm 7.95	44.98 \pm 0.69	9.73 \pm 1.00	15.29 \pm 0.12	17.77 \pm 1.46
CT	<i>P. oceanica</i>	0.75 \pm 0.17	53.13 \pm 1.98	174.29 \pm 3.10	43.16 \pm 0.40	31.83 \pm 0.58	0.70 \pm 0.11	44.15 \pm 0.75
CP	<i>C. elongata</i>	< 0.01	3.87 \pm 0.23	15.42 \pm 5.47	14.79 \pm 1.64	2.07 \pm 0.19	4.93 \pm 0.81	< 0.40
CP	<i>C. balearica</i>	2.13 \pm 0.10	11.00 \pm 1.99	244.63 \pm 8.08	28.62 \pm 0.18	5.18 \pm 0.31	24.75 \pm 0.12	9.25 \pm 0.86
CP	<i>C. compressa</i>	1.22 \pm 0.05	6.95 \pm 2.05	71.35 \pm 4.04	8.31 \pm 0.99	4.91 \pm 0.73	1.06 \pm 0.02	7.63 \pm 0.08
CP	<i>D. spiralis</i>	4.15 \pm 0.49	5.79 \pm 0.13	472.99 \pm 23.89	6.40 \pm 0.42	2.81 \pm 0.19	4.36 \pm 0.15	< 0.40
CP	<i>J. rubens</i>	0.91 \pm 1.34	5.03 \pm 4.47	239.35 \pm 103.04	32.83 \pm 28.43	1.78 \pm 1.58	3.17 \pm 2.82	19.01 \pm 0.09
CP	<i>L. microcladia</i>	1.56 \pm 0.59	14.05 \pm 0.97	133.77 \pm 4.62	24.64 \pm 1.06	5.48 \pm 0.62	7.16 \pm 0.21	7.63 \pm 0.09
CP	<i>P. oceanica</i>	0.55 \pm 0.40	52.17 \pm 1.19	96.31 \pm 4.23	203.89 \pm 2.54	48.34 \pm 0.12	0.67 \pm 0.04	72.25 \pm 2.34
CP	<i>S. filamentosa</i>	45.38 \pm 3.57	18.29 \pm 0.27	1270.91 \pm 59.31	110.46 \pm 3.43	13.53 \pm 0.45	15.16 \pm 1.16	29.42 \pm 0.83
SM	<i>C. coelothrix</i>	22.3 \pm 0.50	30.32 \pm 2.75	1557.97 \pm 124.28	88.80 \pm 4.88	6.17 \pm 0.41	17.32 \pm 0.26	12.94 \pm 1.55
SM	<i>C. compressa</i>	0.92 \pm 0.04	3.16 \pm 0.06	74.44 \pm 13.45	2.11 \pm 0.15	1.67 \pm 0.38	0.72 \pm 0.18	3.23 \pm 0.97
SM	<i>D. spiralis</i>	0.61 \pm 0.18	3.23 \pm 0.14	167.90 \pm 5.25	5.24 \pm 0.18	1.92 \pm 0.17	3.17 \pm 0.15	4.11 \pm 0.15
SM	<i>J. rubens</i>	< 0.01	0.18 \pm 0.31	48.70 \pm 4.28	21.61 \pm 1.75	2.41 \pm 0.31	2.06 \pm 0.49	28.09 \pm 3.75
SM	<i>L. microcladia</i>	0.63 \pm 0.17	15.82 \pm 0.41	158.07 \pm 4.05	56.50 \pm 1.90	9.07 \pm 0.29	10.65 \pm 0.28	56.11 \pm 11.02
SM	<i>P. oceanica</i>	0.79 \pm 0.19	50.8 \pm 0.95	253.26 \pm 31.12	62.34 \pm 1.89	30.82 \pm 1.19	1.19 \pm 0.26	52.83 \pm 4.63
SM	<i>T. atomaria</i>	3.29 \pm 0.43	4.86 \pm 0.39	342.04 \pm 97.42	5.77 \pm 1.22	3.59 \pm 0.26	1.67 \pm 0.37	6.43 \pm 1.02
OM	<i>C. spinosa</i>	2.62 \pm 0.31	5.83 \pm 0.48	390.78 \pm 32.80	21.56 \pm 0.70	5.90 \pm 0.27	4.92 \pm 0.53	6.30 \pm 0.08
OM	<i>J. rubens</i>	< 0.01	4.43 \pm 0.19	138.24 \pm 42.21	33.80 \pm 4.74	2.71 \pm 0.77	4.47 \pm 0.59	12.69 \pm 0.88
OM	<i>L. microcladia</i>	0.62 \pm 0.06	9.79 \pm 1.27	263.46 \pm 33.47	11.39 \pm 1.39	6.41 \pm 0.78	4.89 \pm 0.50	14.31 \pm 0.17
OM	<i>P. oceanica</i>	0.88 \pm 0.63	35.21 \pm 1.76	210.08 \pm 40.51	73.65 \pm 1.89	21.03 \pm 0.44	0.75 \pm 0.01	49.9 \pm 3.03

Table S3. Non-essential element concentrations (mean values \pm standard deviations), expressed on a dry weight basis, in the analyzed macrophytes collected from the different sites of the study area (AH: Agropoli Harbor, TB: Trentova Bay, CT: Cape Tresino, CP: Cape Pagliarolo, SM: San Marco, OM: Ogliastro Marina).

Site	Species	Cd ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)
AH	<i>C. elongata</i>	0.04 ± 0.01	< 0.08
AH	<i>D. spiralis</i>	0.58 ± 0.06	9.79 ± 0.44
AH	<i>P. oceanica</i>	1.74 ± 0.06	2.12 ± 0.01
AH	<i>U. compressa</i>	0.03 ± 0.01	0.28 ± 0.27
TB	<i>C. elongata</i>	0.10 ± 0.01	0.67 ± 0.01
TB	<i>D. spiralis</i>	0.08 ± 0.02	0.57 ± 0.10
TB	<i>H. virgatum</i>	0.14 ± 0.01	1.12 ± 0.18
TB	<i>J. rubens</i>	0.28 ± 0.01	0.64 ± 0.26
TB	<i>P. oceanica</i>	2.34 ± 0.05	4.43 ± 0.28
TB	<i>U. clathrata</i>	0.06 ± 0.01	2.52 ± 0.50
CT	<i>C. aerea</i>	0.04 ± 0.01	0.66 ± 0.17
CT	<i>C. elongata</i>	0.14 ± 0.01	0.24 ± 0.04
CT	<i>C. compressa</i>	1.67 ± 0.46	0.30 ± 0.01
CT	<i>C. crinita</i>	0.12 ± 0.01	1.28 ± 0.20
CT	<i>D. spiralis</i>	0.11 ± 0.02	1.39 ± 0.20
CT	<i>L. microcladia</i>	0.20 ± 0.02	0.78 ± 0.15
CT	<i>L. obtusa</i>	0.21 ± 0.01	1.89 ± 0.20
CT	<i>P. oceanica</i>	1.75 ± 0.11	0.45 ± 0.12
CP	<i>C. elongata</i>	0.10 ± 0.01	0.31 ± 0.03
CP	<i>C. balearica</i>	0.22 ± 0.02	2.05 ± 0.08
CP	<i>C. compressa</i>	0.91 ± 0.05	< 0.08
CP	<i>D. spiralis</i>	0.16 ± 0.01	0.72 ± 0.12
CP	<i>J. rubens</i>	0.23 ± 0.02	1.63 ± 0.26
CP	<i>L. microcladia</i>	0.17 ± 0.01	1.18 ± 0.19
CP	<i>P. oceanica</i>	2.15 ± 0.12	4.27 ± 0.31
CP	<i>S. filamentosa</i>	0.50 ± 0.01	7.30 ± 0.37
SM	<i>C. coelothrix</i>	0.08 ± 0.01	11.76 ± 0.50
SM	<i>C. compressa</i>	0.51 ± 0.03	< 0.08
SM	<i>D. spiralis</i>	0.05 ± 0.01	0.43 ± 0.03
SM	<i>J. rubens</i>	0.14 ± 0.05	2.22 ± 0.10
SM	<i>L. microcladia</i>	0.22 ± 0.01	2.59 ± 0.06
SM	<i>P. oceanica</i>	1.65 ± 0.08	0.88 ± 0.08
SM	<i>T. atomaria</i>	0.10 ± 0.01	0.54 ± 0.06
OM	<i>C. spinosa</i>	0.15 ± 0.03	1.90 ± 0.18
OM	<i>J. rubens</i>	0.22 ± 0.01	1.62 ± 0.43
OM	<i>L. microcladia</i>	0.20 ± 0.01	0.51 ± 0.13
OM	<i>P. oceanica</i>	1.30 ± 0.06	1.97 ± 0.16